

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Hodnocení vybraných vlastností PTA návarů na bázi Co

Assessment of Selected Properties PTA Weld Deposit Based  
on Co

Student:

Bc. Marek Szotkowski

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Szotkowski**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení vybraných vlastností PTA návarů na bázi Co**  
**Assessment of Selected Properties PTA Weld Deposit Based on Co**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte studii vlastností a použití materiálů typu Stellite .
2. Prostudujte vhodné technologie navařování pro tyto materiály.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program anti abrazivních návarů.
4. Proveďte vyhodnocení vybraných vlastností a proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


HRIVNÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.  
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 16.12.2011  
Datum odevzdání: 21.05.2012



  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2012

Marek Šimánek

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21. 5. 2012 .....

 .....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Marek Szotkowski

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Žihla 975, Jablunkov 73991



## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

SZOTKOWSKI, M. *Hodnocení vybraných vlastností PTA návarů na bázi Co: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 51 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Předložená diplomová práce se zabývá rozbořem vlastností PTA návaru kobaltu pod označením Stelit. V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti Stelitu a oblasti jeho využití, zvláštní pozornost je věnována Stelitu 6. Součástí rešerše je zhodnocení vhodných metod navařování se zaměřením na metodu PTA. V experimentální části jsou vyhodnoceny čtyři vzorky, které se liší použitými navařovacími parametry. U vzorků je hodnocena makro a mikrostruktura materiálu, dále makrotvrdost a mikrotvrdost. Hlavním cílem práce je stanovení vhodných postupů navařování s ohledem na co nejplynulejší přechod tvrdosti v oblasti návar – základní materiál.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

SZOTKOWSKI, M. *Assessment of Selected Properties PTA Weld Deposit Based on Co : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanical technology, 2012, 51 p. Thesis head: Ochodek, V.

This thesis deals with the analysis of PTA weld properties of cobalt under the designation Stellite. In the theoretical part of this work are described the properties of Stellite and its use, particular attention focuses on the Stellite 6. A part of the review is evaluation of the suitable welding methods, focusing on the PTA method. In the experimental part are evaluated four samples, which are different in welding parameters. The samples are evaluated in macro-and microstructure of the materials, then macrohardness and microhardness. The main goal is to determine appropriate welding procedures with regard to the hardness of the transition as smooth as possible in the surface - the base material.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	7
0 Úvod .....	8
1 Využití Stelitu a jeho charakteristické vlastnosti .....	10
1.1 Vliv chemických prvků .....	10
1.2 Nejčastěji používané slitiny kobaltu .....	12
2 Charakteristické vlastnosti a použití Stelitu 6 .....	13
3 Vhodné technologie pro navařování Stelitu .....	16
3.1 Svařovací drát .....	17
3.2 Svařovací elektroda .....	18
3.3 Trubičkový svařovací drát .....	19
3.4 Přídavný materiál ve formě prášku .....	20
4 Navařovací metoda PTA .....	23
4.1 Princip PTA procesu .....	24
5 Postup navařování .....	31
5.1 Základní materiál .....	32
5.2 Mezivrstva .....	32
5.3 Návar Stelitu 6 .....	32
6 Výsledky metalografických zkoušek .....	33
6.1 Makrostruktura a makrotvrdost .....	34
6.1.1 Hodnocení makrotvrdosti .....	34
6.1.2 Hodnocení makrostruktury .....	37
6.2 Mikrotvrdost a mikrostruktura .....	39
6.2.1 Vyhodnocení mikrotvrdosti .....	39
6.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury .....	41
7 Závěr .....	45
8 Seznam použité literatury .....	48
9 Seznam příloh .....	51

## Seznam použitých značek a symbolů

Ac <sub>3</sub>	teplota začátku transformace austenitu na ferit	
°C	Stupeň Celsia	
ČSN	Česká technická norma	
EN	Evropská norma	
HV	Tvrdost podle Vickerse	
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel	
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	
K	Kelvin	
MAG	138 – Obloukové svařování plněnou elektrodou s kovovým práškem v aktivním plynu	
MIG	133 – Obloukové svařování tavicí se plněnou elektrodou s kovovým práškem v inertním plynu	
MMA	111 – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	
PT	Prášková metalurgie	
PTA	Plasma Transferred Arc	
R <sub>e</sub>	Mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
TIG (WIG)	141 - Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
T <sub>p</sub>	teplota přehřátí	
T <sub>s</sub>	teplota solidu	
hm. %	hmotnostní procento	
Ø	Průměr	[mm]

## 0 Úvod

Jan Amos Komenský (1592 - 1670) „Ne ze souhlasu, ale z pochybnosti se rodí pokrok“. Objektivní kritický přístup k hodnocení dosažených výsledku, vede k uvědomění si chyb a to je první krok ke zlepšení. Hodnocení vlastnosti PTA návaru na bázi kobaltu, které je podstatou této diplomové práce má vést k efektivnějšímu využití vyspělé navařovací technologie jakou Plasma Transferred Arc (PTA) bezesporu je.

Slitina kobaltu pod obchodním označením Stelit se používá k ochraně proti velmi agresivnímu okolí. Součástka, kterou je zapotřebí ochránit je většinou vyrobena z konvenčního typu ocele u které ochrana vůči agresivnímu okolí není tak vysoká. U součástky, která se takto chrání, se životnost velmi prodlouží. V opačném případě se velmi rychle opotřebí a musí se vyměnit. Tímto se může docílit velmi zajímavých ekonomických úspor.

U vzorků, které jsou hodnoceny byl navržen postup navařování s ohledem na rizika vzniku strmého přechodu tvrdosti v oblasti návar – základní materiál. V této oblasti je velké riziko vzniku trhliny při namáhání.

Je hned několik způsobu přenosu Stelitu na povrch součástky, kterou chceme ochránit. Nejčastěji volíme takový způsob přenosu, který zaručuje nanesení vrstvy v potřebné tloušťce, kterou vyžadujeme. V této diplomové práci, byl zvolen způsob přenosu, který zaručuje navaření homogenní vrstvy v tloušťce několika milimetru. Technologii PTA lze dosáhnout navaření velmi kvalitního povrchu, který nemusí být dále opracován. Kombinací s automatizací lze výrobu velmi zefektivnit.

V diplomové práci jsou popsány různé druhy Stelitu a jejich využití. Jsou popsány i metody, kterými lze tento materiál navařovat a jakých výsledku jde těmito metodami dosáhnout. Toto shrnutí může napomoci k vhodné volbě metody navařování Stelitu.

Vlastnosti, které jsou hodnoceny na navařené vrstvě jsou makro a mikrostruktura. Jednotlivé oblasti budou vyhodnoceny i z hlediska makrotvrdosti a mikrotvrdosti. Hodnocení struktury a to především u mikrostruktury v oblasti částečného natavení a přehřáté oblasti z důvodu tvorby velkých zrn a vzniku nevyhovujících struktur. Z hlediska tvrdosti bude důležitá oblast přechodu návar – základní materiál.

Poznatky, které jsou v této diplomové práci mají vést k efektivnějšímu využívání navařovacích slitin Stelitu. Díky odlišnému způsobu řešení technologického postupu navařování, které je v této práci vyhodnocováno může vést ke změně stávajících technologických postupů, které zlepši odolnost navařené vrstvy proti odloupení při vyšším namáhání.

V zadání diplomové práce jsou stanovené čtyři okruhy témat k vypracování, které budou popsány v následujících kapitolách. V této kapitole jsou stanoveny obecné cíle, které budou kritériem úspěšnosti této diplomové práce. Mezi cíle byl zařazen požadavek na kvalitu povrchu bez vměstku, trhlin, zápalu, póru apod. Důležitý cíl je také dosažení vhodných velikosti, tvaru a struktury zrna zaručující příznivé mechanické vlastnosti.

U navařovací metody PTA je velmi malé promísení se základním materiálem. S kombinací dvou odlišných materiálu o různé tvrdosti, která může být i více než 100 HV vzniká reálné riziko vzniku velmi strmého přechodu tvrdosti v oblasti návar – základní materiál. U jiných metod navařování je toto riziko eliminováno větším stupněm promísením, takže je odlišná velikost tvrdosti rozložená na delší vzdálenost a z toho důvodu není tak strmá. U navařovací metody PTA je ostrý přechod tvrdosti na velmi krátké vzdálenosti. Z tohoto důvodu byl stanoven hlavní cíl diplomové práce určit vzorek, který dosahuje co nejpozvolnějšího přechodu tvrdosti v této oblasti. Dodržení tohoto cíle bude stěžejní v této diplomové práci.

# 1 Využití Stelitu a jeho charakteristické vlastnosti

„Stellite“ níže už jen Stelit je slitina určitých chemických prvků s kobaltovým základem, která zaručuje jeho speciální vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří odolnost proti opotřebení zvláště při vysokých teplotách, pevnost a odolnost proti korozi a je také nemagnetická. Využívá se především u sedel ventilů a sedel ventilů pro ventily a to zejména u výfukových ventilů spalovacích motorů. Využití našel i ve zbrojním průmyslu jako např. součást kulometu M2HB nebo M60. V medicíně se využívá u náhražek kyčelních kloubů a u zubních protéz. Stellite je chráněnou značkou firmy Deloro Stellite Company a vynalezl ho Elwood Haynes. Stelity můžeme rozdělit podle legujících prvků do tří hlavních skupin [1; 9; 24].

- Co-Cr-W-C (tradiční slitiny)
- Mo-Ni-Fe (modifikace tradiční skupiny)
- B-Si (další modifikace)

Tyto slitiny kobaltu vykazují vynikající odolnost proti otěrům, korozi a erozi i při vysokých teplotách používání, přičemž vykazují poměrně vysoký stupeň tvrdosti. Mluvíme-li o tvrdosti navařovaných Stelitu pomocí prášku, pohybují se tyto hodnoty i kolem 750 HV. Škála tvrdosti Stelitu používaného pro navařování je od 240 až po již zmíněných 750 HV, nejširší okruh tvrdosti Stelitu je 350 až 510 HV. Je třeba mít na paměti, že důležitý faktor ovlivňující tvrdost je velikost parametrů svařování, popřípadě rozsah ředění prášku [1]. Kobaltové slitiny pod označením Stelit se používají především jako opatření proti opotřebení a jejich nejčastější aplikace a i nejvhodnější použití je ve formě navařování popřípadě nástříku.

## 1.1 Vliv chemických prvků

Hlavní chemickou složkou je **kobalt**. Tento prvek zrychluje ve slitinách perlitickou reakci a zároveň snižuje prokalitelnost, snižuje i obsah zbytkového austenitu. Jako jediná legura zvyšuje tepelnou vodivost ocele. Snižuje podstatným způsobem energii vrstevné chyby a tím zvyšuje odpor oceli proti plastické deformaci. V legovaném přesyceném feritu urychluje precipitační procesy. V martenzitický stárnoucích ocelích je základní legurou.

Kobaltu se užívá v nástrojových ocelích tehdy, kdy je zapotřebí udržet vysokou tvrdost nástroje i při vysokých teplotách [2; 3].

**Chrom** - zvyšuje silně prokalitelnost oceli. Strukturu chromových ocelí velmi ovlivňuje svým obsahem uhlík. Chrom zpomaluje pokles tvrdosti popouštění, zvyšuje odolnost proti korozi a opalu. Chrom je karbidotvorný prvek, který výrazně zpevňuje ocel i svarový kov.

**Wolfram** - způsobuje sekundární tvrdost při popouštění a je velmi důležitým prvkem nástrojových ocelí, tyto ocele mají vysokou tvrdost i při vysokých teplotách. Wolfram také omezuje rozvoj vysokoteplotní popouštěcí křehkosti, oproti molybdenu, který také způsobuje vysokoteplotní popouštěcí křehkost, ale tato intenzita wolframu je třikrát menší.

**Uhlík** - je přítomen ve všech ocelích a rozhodujícím způsobem ovlivňuje svařitelnost, tento faktor se vypočítá pomocí tzv. uhlíkového ekvivalentu, ve kterém jsou zahrnuty i jiné chemické prvky. Uhlík ovlivňuje především mechanické vlastnosti ocele. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty  $R_e$  a  $R_m$  v oceli a snižují se její plastické vlastnosti. S rostoucím obsahem uhlíku v oceli se zvyšují také hodnoty tvrdosti martenzitu, který vzniká ve svarech při velkých rychlostech ochlazování.

**Nikl** - zvyšuje stabilitu austenitu a při perlitické transformaci se soustřeďuje do feritu. Nikl snižuje transformační teploty oceli a při vyšším obsahu niklu v oceli má přeměna austenitu na ferit martenzitickou povahu. Také zvyšuje prokalitelnost, zlepšuje tvárnost a houževnatost ocelí při nízkých teplotách, zejména v kaleném a nízko popouštěném stavu. Je nezastupitelnou legurou ve speciálních slitinách se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.

**Molybden** - silně zvyšuje prokalitelnost. Pokud je molybden rozpuštěn v tuhém roztoku přispívá k substitučnímu zpevnění materiálu. Výrazně precipitačně zpevňuje ocel i svarový kov.

**Křemík** – působí silně deoxidačně. Nedostatek tohoto prvku vede k tomu, že je ocel neuklidněná (pod 0,1hm%) [4].



## 1.2 Nejčastěji používané slitiny kobaltu

**Stelit 1** – po navaření má vysokou odolnost proti korozi a otěru. Využívá se u čerpadel a rotačních těsnicích kroužků. Zachovává dostatečnou tvrdost i při teplotách nad 760°C.

**Stelit 3** – vlastnosti a využití je podobné jako u Stelitu 1, obsahuje, ale nižší obsah uhlíku a navíc asi 0,5% boru.

**Stelit 4** – má velmi dobrou pevnost při vysokých teplotách. Je používán při lisování za tepla.

**Stelit 6** – je nejrozšířenější slitina kobaltu a vykazuje dobrou všestrannou odolnost. Má velmi dobrou odolnost vůči mnoha formám mechanického a chemického opotřebení. Je ideální pro různé formy navařování. Více je popsáno ve druhé kapitole.

**Stelit 6B** – je speciální slitina kobaltu pro extrémní podmínky opotřebení, otěru za vyšších teplot. Má nízký koeficient tření a vyznačuje se dobrou odolností proti korozi, vyznačuje se také dobrou odolností proti teplotnímu šoku.

**Stelit 6K** – má vynikající odolnost proti většině typu opotřebení. Do určité míry nahrazuje metody pro větší tvrdost povrchu jako tepelné zpracování, nitridování, galvanické pokrytí. Vysoké teploty mají jen malý vliv na tvrdost, houževnatost a rozměrovou stabilitu. Odolává atmosférické oxidaci při nízkých i při zvýšených teplotách. Má dobrou kombinaci odolnosti proti opotřebení, odolnost proti korozi i za vysokých teplot. Má nižší tažnost než Stelit 6B.

**Stelit 12** – má odolnost proti korozi za vyšších teplot s dobrou odolností proti opotřebení a otěru. Tento Stelit obsahuje až 1,85% C. Jeho využití je například u břitů nožů.

**Stelit 21** – má velmi dobrou odolnost vůči tepelným a mechanickým nárazům. Při vysokých teplotách má dobrou pevnost. Využívá se u ventilů v petrochemickém průmyslu.

**Stelit 25** – tento wolframem posílená kobaltová slitina s nízkým obsahem uhlíku má dobrou odolnost proti tepelné únavě. Slitina odolává proti opotřebení i při vysokých teplotách.

**Stelit 31** – někdy označován jako Stelit X-40 s vysokou pevností v tahu. Má dobrou odolnost vůči tepelným a mechanickým nárazům. Používá se především v plynových turbínách v oblasti, kde materiály podléhají erozi z důvodu horkých plynů.

**Stelit 190** – má větší obsah uhlíku než ostatní Stelity. Doporučuje se proto pro prostředí s velkým abrazivním opotřebením. Je potřeba dbát na zvýšenou citlivost tohoto Stelitu na mechanické a teplotní šoky.

**Stelit 694** – má vyšší obsah wolframu, z důvodu zajištění vyšší pevnosti při vysokých teplotách. Je odolný vůči erozi a kavitaci. Používá se v částech plynových turbín, kde je požadována vyšší tvrdost než u Stelitu 31.

**Stelit 706** – je vysoce odolný proti korozi v atmosféře se zlepšenými vlastnostmi proti opotřebením.

**Stelit 712** - má dobrou odolnost proti korozi v redukčním prostředí, stejně jako zvýšenou odolnost proti opotřebení.

**Stelit F** – byl speciálně navržen pro navařování na ventily ve spalovacích motorech, zvyšuje také odolnost proti korozi a erozi. Má mírně vyšší tvrdost, vyšší odolnost proti erozi a korozi než Stelit 6.

**Stelit Star J** – se doporučuje pro práci v extrémních podmínkách opotřebením, otěru a tepla.

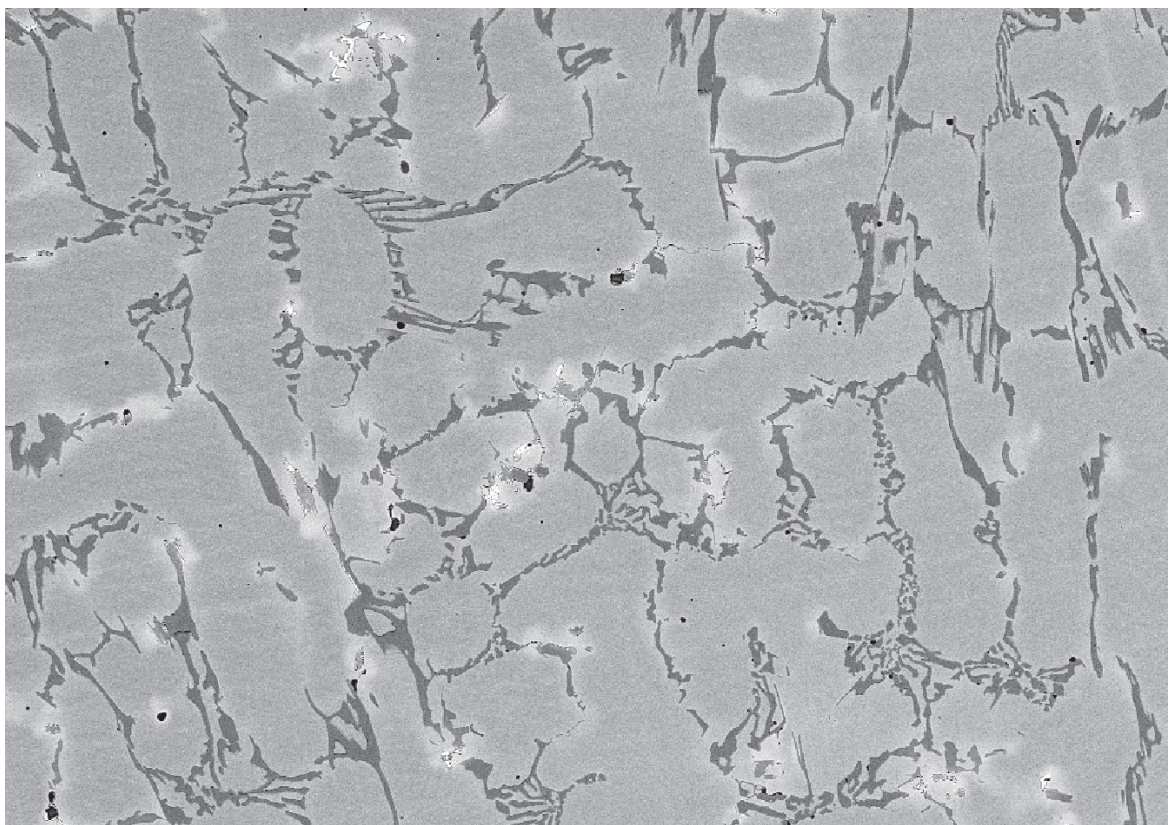
## 2 Charakteristické vlastnosti a použití Stelitu 6

Stelit 6 je nejvíce používaná slitina kobaltu. Má vynikající odolnost vůči mnoha formám mechanického i chemického opotřebením v širokém rozsahu teplot. Jedna z hlavních předností je odolnost proti otěru. Této vlastnosti se využívá např. u sedel ventilu. Je také velmi odolný proti korozi i při vysokých teplotách. Tyto vlastnosti jsou dosaženy karbidovou strukturou rozptýlenou v Co-Cr slitinové matici. Díky této struktuře je dosaženo přiměřeného stupně tvrdosti i při 500°C. Má také dobrou odolnost proti teplotnímu nárazu a kavitací erozi. Odolává oxidaci do 1095°C. Odolnost vůči mořské vodě je vyjádřena úbytkem materiálu o tloušťce 0,05 mm za rok při 22°C. Tento Stelit se

velmi hodí pro navařování a opracování je možno provést pomocí nástrojů ze slinutých karbidů.

Kavitačně-erozní odolnost je u Stelitu 6 desetkrát větší než u nerezové oceli SS 304. Odolnost proti otěru při nízkém napětí je desetkrát větší než u nerezové ocele 304 a 1020 a nejméně dvakrát odolnější než u kalené ocele 1090 (Rc55). Dále je Stelit 6 odolný vůči oxidačním kyselinám, jako je kyselina mravenčí, octová, fosforečná a sírová při nízké koncentraci. Zároveň není odolná proti silně redukčním kyselinám, jako je kyseliny chlorovodíková a různé chloridové roztoky.

Stelit 6 je hojně využíván na součástech armatur a čerpadel, lopatek turbín. Využití našel také u hřídelí, ložisek, různých pouzder, objímek, nátrubku, vložek, nožů a nástrojů pro protlačování [17].



Obrázek 1 - Struktura Stelitu 6 při 1000x velkém zvětšení [1].

Tabulka 1 – Chemické složení Stelitu 6 a hlavní mechanické vlastnosti [1].

Cr	27 – 32 %	Tvrdost	380 – 490 HV
W	4 – 6 %	Hustota	8,44 g/cm <sup>3</sup>
C	0,9 – 1,4 %	Teplota tání	1285–1410 °C
Ostatní	Ni, Fe, Si, Mn a Mo		

Tabulka 2 – Jmenovitý koeficient teplotní roztažnosti (od 20°C do teploty uvedené v tabulce) [1].

100°C	11,35 µm	600°C	14,5 µm
200°C	12,95 µm	700°C	14,7 µm
300°C	13,6 µm	800°C	15,05 µm
400°C	13,9 µm	900°C	15,5 µm
500°C	14,2 µm	1000°C	17,5 µm

Tabulka 3 – Tvrdost v HV při dané teplotě [1].

20°C	410 HV	500°C	301 HV
100°C	390 HV	600°C	235 HV
200°C	356 HV	700°C	155 HV
300°C	345 HV	800°C	138 HV
400°C	334 HV	900°C	95 HV

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti při pokojové teplotě [1].

Mez pevnosti v tahu Rm	Smluvní mez kluzu Rp 0,2%	Tažnost	Modul pružnosti
1265 MPa	750 MPa	3 – 5 %	237 GPa

Informace v tabulkách 1 až 4 jsou pouze informativní a hodnoty se mohou lišit od skutečnosti. Jednotlivé vlastnosti Stelitu 6 velmi výrazně ovlivňuje navařovací parametry a zvolená metoda navařování.

### 3 Vhodné technologie pro navařování Stelitu

Navařování je metalurgický proces, při kterém je základní materiál nataven pomocí působení zdroje tepla, který také natavuje přídavný materiál, čímž se na základním materiálu vytvoří homogenní kovová nebo slitinová vrstva. Důležitým faktorem při navařování je co nejvíce snížit hloubku závaru a tím snížit velikost promísení základního materiálu s materiálem přídavným. Cílem navařování by mělo být i omezení vneseného tepla do navařovaného dílce a tím omezení vzniku pnutí a deformací [7]. Je proto nutné u jednotlivých technologií volit takové navařovací parametry a postupy, aby hloubka závaru byla minimalizována. Navařování má v porovnání s jinými způsoby vytváření funkčních povrchu své výhody i nevýhody.

#### **Výhody:**

- pomocí vhodných druhů přídavných materiálu jak tvaru, tak složením a za působení vysoce výkonných zdrojů tepla je možno dosáhnout vysoké produktivity
- navařovaná tloušťka může dosahovat i několik desítek mm
- navařovaná vrstva je spojená se základním materiálem metalurgicky
- navařená vrstva je kompaktní
- pomocí tepelného zpracování lze získat požadované vlastnosti u základního materiálu a návaru
- svařovací zařízení je obvykle stejné jako při svařování a mění se z pravidla jen parametry a přídavný materiál

#### **Nevhody:**

- navařované vrstvy je nutno obvykle opracovat pro dosažení určitého stupně drsnosti tak pro dosažení rozměrové přesnosti
- navařovací proces je zpravidla náročný na energie
- dochází k pnutím a deformacím

- navaření tenkých vrstev v řádu desetinách mm je velmi složité
- je obtížné docílit minimálnímu promísení mezi přídavným a základním materiálem
- v přechodové vrstvě základní materiál – návar dochází ke změně struktury
- základní materiál je velmi tepelně ovlivněn

Navařovací metody vhodné pro navařování slitin kobaltu je hned několik. Slitiny kobaltu je možno navařovat běžnými metodami pro svařování. Volba metody navařování se volí podle:

- velikosti navařované vrstvy
- výsledné kvality povrchu navařené vrstvy
- z ekonomického hlediska se volí metody vhodné pro robotizaci a automatizaci
- z důvodu tvarové složitosti dílce pro navařování

Materiál Stelit se dodává ve formě přídavného materiálu jako elektroda, drát, trubičkový drát a ve formě prášku. Postupně budou popsány jednotlivé metody s větším zaměřením na svařovací metodu PTA v kapitole 4.

### 3.1 Svařovací drát

Využití u svařovací metody 141, výhodou této metody běžně užívaného označení TIG (WIG) je jeho jednoduché manuální ovládání, dobra kontrola svařovacího oblouku tavicí se lázně. Další metodou, která využívá přídavný materiál Stelit ve formě svařovacího drátu je svařovací metoda 311 a to kysliko-acetylenové svařování. Obě tyto metody mají nevýhodu v rychlosti svařování.

Svařovací dráty se dodávají o průměru 2,6 3,2 4,0 5,0 6,4 a 8,0 mm a o chemickém složení a tvrdosti dle tabulky 5.

Tabulka 5 – Chemické složení v % Stelitu dodávaného ve formě svařovacího drátu [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite 1	32	12	2,45	<3	<1	<3	<2	<0,5	530 – 615
Stellite 6	30	4-5	1,2	<3	<1	<3	<2	<0,5	390 – 445
Stellite 12	30	8	1,4-1,8	<3	<1	<3	<2	<0,5	460 – 530
Stellite 20	33	16	2,45	<3	<1	<3	<2	<0,5	560 – 675
Stellite 21	28	-	0,25	3	5,2	<3	<1,5	<0,5	285 – 390
Stellite 22	28	-	0,3	1,5	12	<3	<2	<0,5	400 – 500
Stellite 25	20	14	0,1	10	<1	<3	<1	<0,5	240 – 445
Stellite 31	26	7,5	0,5	10	-	<2	<1	<0,5	240 – 345
Stellite F	26	12	1,7	22	<1	<3	<2	<0,5	390 – 445
Stellite 107	31	4	2	24	-	<2	<3	<0,5	370 – 470
Stellite 190	27	13,5	3,2	<1	<1	<3	1	<0,5	580 – 675
Stellite 250	28	-	0,1	-	-	21	<1	<0,5	240 – 285
Stellite 306	25	3	0,5	6	-	4	1	6% Nb	320 – 410
Stellite 694	28	19	1	5	-	<3	1	1% V	485 – 580
Stellite 706	31	-	1,2	<3	4	<3	<1	<1	380 – 435
Stellite 712	31	-	1,5/1,9	<3	8	<3	<2	<1	460 – 530
ULTIMET	26	2	0,06	9	5	3	-	<1	285 - 445

### 3.2 Svařovací elektroda

Využívají se pro svařovací metodu 111 - ruční svařování obalenou elektrodou (MMA) [18]. Svařovací elektrody mají nízký obsah vodíku, kyslíku a dusíku a tímto se zlepšuje mechanické vlastnosti navařeného Stelitu. Typ obalu je rutilový o celkové délce elektrody 350 mm a variantách tloušťek elektrod 2,6 3,2 4,0 5,0 a 6,4 mm. Chemické složení a tvrdosti svařovacích elektrod jsou v tabulce 6.



Tabulka 6 – Chemické složení v % Stelitu dodávaného ve formě svařovací elektrody [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite 1	31	12	2,45	<3	<1	<3	<2	<1	530 – 615
Stellite 6	29	4	1,2	<3	<1	<3	<2	<1	380 – 420
Stellite 12	30	8	1,4-1,8	<3	<1	<3	<2	<1	445 – 510
Stellite 20	32	16	2,45	<3	<1	<3	<2	<1	560 – 635
Stellite 21	28	-	0,25	3	5,5	<3	<1,5	<1	285 – 390
Stellite 25	20	14	0,1	10	<1	<3	<1	<1	240 – 445
Stellite 250	28	-	0,1	-	-	21	<1	<1	240 – 285
Stellite 306	24	3	0,5	6	-	4	1	6% Nb	320 – 410
Stellite 706	30	-	1,2	<3	4	<3	<1	<1	380 – 435
Stellite 712	30	-	1,5/1,9	<3	8	<3	<2	<1	460 – 530
ULTIMET	26	2	0,06	9	5	3	-	<1	285 - 445

### 3.3 Trubičkový svařovací drát

Oproti výše uvedeným metodám navařování, lze pomocí trubičkového drátu navařování z automatizovat a tím zefektivnit výrobu. U trubičkového svařovacího drátu je mírně vyšší obsah Fe než u ostatních druhů přídavných materiálů. Je zde také snadné uskladnění přídavného materiálu. Stelit dodávaný ve formě trubičkového svařovacího drátu je mnohem vhodnější pro navařování z důvodu menšího promísení se základním materiálem za pomoci vhodného přenosu přídavného materiálu do svarové lázně, při metodách svařování 133/138 známé také pod označením MIG/MAG. Vysokou podobou automatizace je možnost využít metody 124 Svařování pod tavidlem s přídavkem kovového prášku [18].

Tabulka 7 – Chemické složení v % Stelitu ve formě přídavného materiálu jako trubičkový svařovací drát [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite 1	28	11,5	2,45	<3	<1	<5	<2	<1	510 – 595
Stellite 6	30	4,5	1,2	<3	<1	<5	<2	<1	370 – 435
Stellite 12	29	8	1,4-1,8	<3	<1	<5	<2	<1	445 – 510
Stellite 21	28	-	0,25	3	5,2	<5	<1,5	<1	285 – 390
Stellite 21LC	26	-	0,1	4	6	<5	<1,5	<1,5	265 – 390
Stellite 25	20	14	0,1	10	<1	<3	<1	<1	240 – 445
Stellite 250	28	-	0,1	-	-	21	<1	<1	240 – 285
Stellite 306	25	2-3	0,5	6	-	6	1	6% Nb	320 – 410
Stellite 706	31	-	1,2	<3	4	<3	<1	<1	380 – 435
Stellite 712	31	-	1,5/1,9	<3	8	<3	<2	<1	460 – 530
ULTIMET	26	2	0,06	9	5	3	-	<1	285 - 445

### 3.4 Přídavný materiál ve formě prášku

Ve formě prášku je možné aplikovat Stelit pomocí různých technologií žárových nástřiků. Jako například HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) kdy je prášek nahrán a vystřelen pomocí plamene a horkých plynů velkou rychlostí na podklad.

Tabulka 8 – Chemické složení v % Stelitu pro HVOF a Thermal Spray powders [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite 157	21	4,5	<0,2	-	-	-	1,5	B 2,4	Není k dispozici

Stelit ve formě prášku lze aplikovat i například pomocí práškové metalurgie (PM). Další možnosti je žárový nástřik s následným přetavením.

Tabulka 9 – Chemické složení v % Stelitu pro žárový nástřik s následným přetavením [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite SF1	19	13	1,3	13,5	2,45	3	2,8	<0,5% Mn	510 – 700
Stellite SF6	19	7,5	0,8	14	1,7	3	2,6	<0,5% Mn	390 – 485
Stellite SF12	19	9	1,1	14	1,9	3	2,8	<0,5% Mn	410 – 545
Stellite SF20	19	15	1,6	14	2,9	3	3,2	<0,5% Mn	595 – 830
Stellite 157	21	4,5	0,1	<2	2,5	<2	1,6	<0,5% Mn	445 – 595

Velmi často využívaná metoda navařování pomocí přídavného materiálu ve formě prášku je PTA (Plasma Transferred Arc). Tato metoda bude obsáhleji popsána ve čtvrté kapitole. Lze navařovat i pomocí laseru u toho to typu navařování je přídavný materiál ve formě prášku stejný jako u metody PTA.

Tabulka 10 – Chemické složení v % a tvrdost stelitu, který je dodáván ve formě prášku pro návary pomocí plazmy a laseru [1]

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní	HV
Stellite 1	30	13	2,5	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1	530 – 700
Stellite 4	30	13,5	0,7	< 2,5	< 1	< 2,5	< 1	< 1	390 – 510
Stellite 6	28,5	4,6	1,2	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1	390 – 460
Stellite 6LC	29	4,5	1,11	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1	370 – 430
Stellite 6HC	28,5	4,6	1,35	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1	420 – 560
Stellite 12	30	8,5	1,45	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1	420 – 560
Stellite 20	32,5	17,5	2,55	< 2	< 1	< 2	< 1	< 1	540 – 750
Stellite 21	27,5	-	0,25	2,6	5,4	< 2	< 2	< 1	280 – 390
Stellite 22	28	-	0,3	1,5	12	< 3	< 2	< 0,5	400 – 500
Stellite 25	20	15	0,1	10	< 1	2	< 1	1,9% Mn	240 – 450
Stellite 31	26	7,5	0,5	10,5	< 1	< 2	< 1	< 0,5	240 – 350
Stellite F	26	12,5	1,8	22	< 1	< 2	1,1	< 0,5	390 – 450
Stellite 156	28	4	1,7	< 2	< 1	< 0,5	< 2	< 1	460 – 580
Stellite 157	22	4,5	0,1	-	-	-	1,6	2,6% B	580
Stellite 158	26	5,5	0,8	-	-	-	1,2	0,7% B	460
Stellite 190	26	14	3,4	< 2	< 1	< 2	< 1	< 1	600 – 700
Stellite 238	26	-	0,1	-	3	20	-	< 1	240 – 265
Stellite 250	28	-	0,1	< 1	< 1	20	0,75	< 1	240 – 285
Stellite 251	28	< 1	0,28	< 1	< 1	18	0,75	2% Nb	265 – 350
Stellite 306	25	3	0,55	6	-	< 2,5	< 2	7% Nb	340 – 400
Stellite 694	28,5	19,5	0,9	5	-	< 3	< 1	1% V	460 – 550
Stellite 706	29	-	1,25	< 2	4,5	< 2	< 1	< 1	380 – 430
Stellite 712	29	-	2	< 2	8,5	< 2	< 1	< 1	460 – 560

Tabulka 11 – Pokračování tabulky 10 [1]

Stellite 2006	31	-	1,3	8	8	18	1	-	430
Stellite 2012	33	-	1,7	8	10	15	1,5	-	510
Stellite SF1	19	13	1,3	14	-	-	3	2,5% B	600
Stellite SF6	19	7,5	0,7	14	-	-	2,5	1,5% B	430
Stellite SF12	19	9	0,9	14	-	-	3	2,5% B	480
Stellite SF20	19	15	1,5	14	-	-	3	3% B	700
ULTIMET	26	2	0,07	9,4	5	3	< 1	< 1	240 - 450

## 4 Navařovací metoda PTA

Plazma jako fyzikální pojem byl zaveden v roce 1923 a zavedl ho americký chemik a fyzik I. Langmuir jako speciální stav plynu, často označován jako čtvrtý stav hmoty. Ke vzniku plazmy (plazma, plazmatu) je zapotřebí ionizovaný plyn a ten je vytvořen buď mechanicky, nebo tepelně. Díky tomu dochází k vyražení nebo k uvolnění elektronů z vnějších valenčních (orbitálních) sfér atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Kladný náboj má ionizované jádro atomu se zbývajících elektrony. Plazma se chová navenek jako elektricky neutrální (kvazineutralita) [6]. Běžné plyny se při zahřátí řídí klasickými termodynamickými a fyzikálními zákony. Plazma se těmito zákony neřídí a je proto považována za 4 skupenství hmoty.

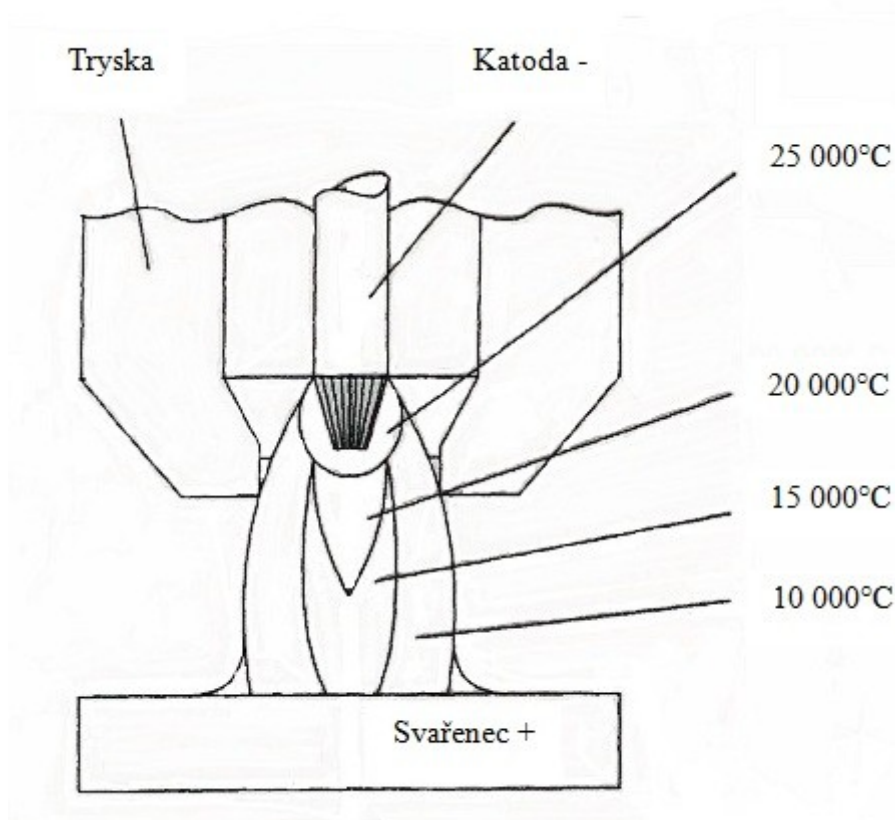
Zdrojem tepla je často elektrický oblouk, který ionizuje plyn. Elektrický oblouk je kontrahován průchodem malým průměrem výstupní trysky a za pomoci zvýšení teploty se dosáhne vyššího stupně ionizace.

Elektrická vodivost plazmy je velmi závislá na pohyblivosti elektronů, při 20 000 K dosahuje vodivosti kovových materiálů. Na plazmu silně působí také elektrické a magnetické pole.

## 4.1 Princip PTA procesu

Vlastní princip navařovací metody PTA vychází ze svařovací metody 141 TIG (WIG), kde keramickou hubici nahradila kovová tryska chlazenou vodou nebo plynem. V principu existují dva způsoby zapojení hořáku.

**Zapojení závislé** (přenesený oblouk) u kterého je na wolframovou elektrodu s 2% thoria zapojen záporný pól a kladný pól na materiál. Pro zapálení pomocného oblouku se používá VF ionizátor, který je zapojený ke kovové trysce. Díky pomocnému oblouku vznikne dostatečně vodivé prostředí pro snadné zapálení hlavního oblouku. Zapálení hlavního oblouku jde díky tomu i na větší vzdálenost. Tento druh zapojení je na obrázku 2 a využívá se především u svařování, řezání a navařování.



Obrázek 2 – Závislé zapojení s popisem teplot na oblouku [1].

**Nezávislé zapojení** (nepřenesený oblouk) je takové zapojení pólů zdroje, které je mezi elektrodou a kovovou tryskou. Toto zapojení se využívá především u žárového nástřiku.

Pro plazmové svařování se používají tři druhy plynu [6].

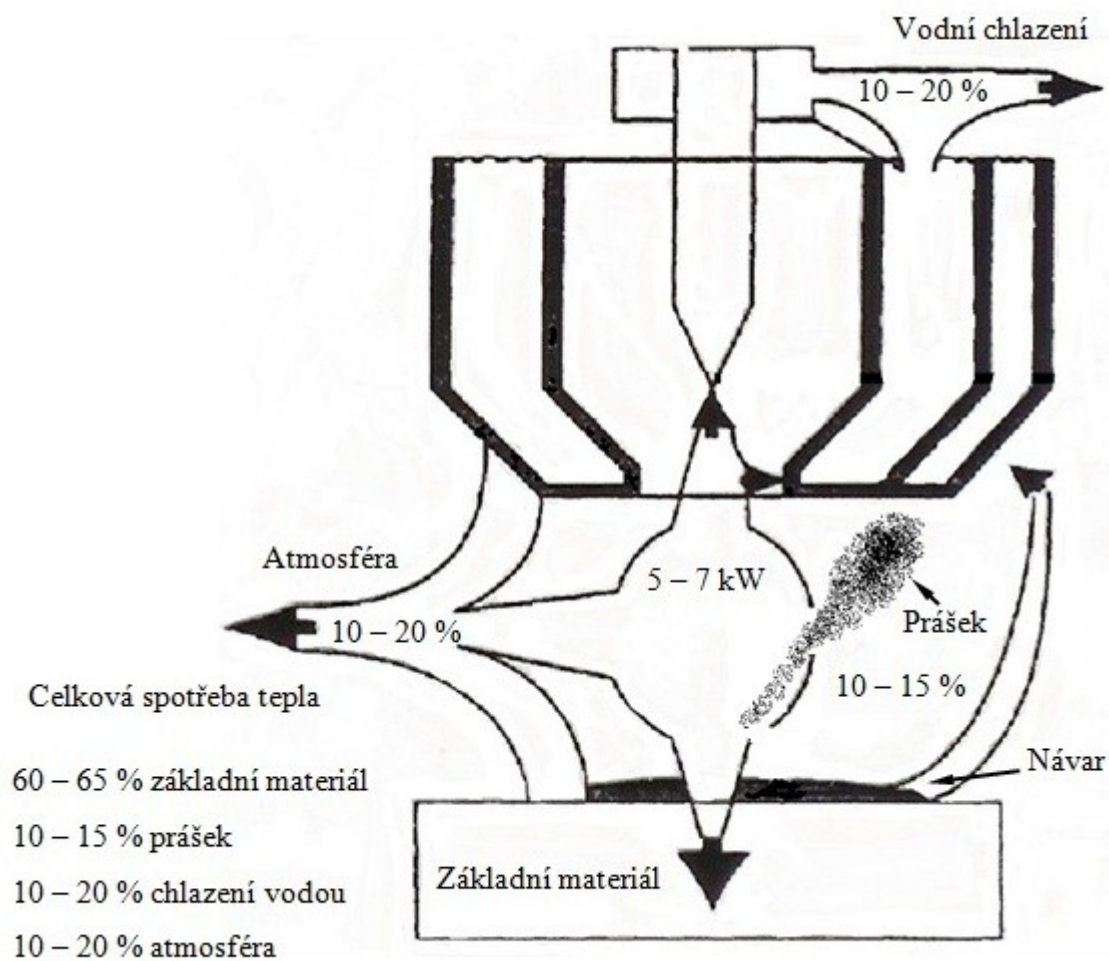
- plazmový: Ar, Ar + H<sub>2</sub>, Ar + He, s průtokovou rychlostí 0,5 – 20 l/min<sup>1</sup>
- fokusační: (jen výjimečně) používá se z důvodu zúžení plazmového paprsku, rychlost průtoku 3 – 18 l/min<sup>1</sup>
- ochranný: používá se pro ochranu svarové lázně proti oxidaci okolním vzduchem při rychlosti průtoku 2 – 20 l/min<sup>1</sup>

Zúžení výstupní trysky u plazmového hořáku přispívá ke kontrakci plazmového paprsku. Kontrakce je také podporována fokusačním plynem přiváděným k plazmovému paprsku. Pro fokusační plyny jsou vhodné směsi argonu s dusíkem anebo vodíkem. Dvouatomové plyny, které mají vysokou spotřebu energie na disociaci a s velkou tepelnou kapacitou, odebírají teplo z vnějších vrstev plazmatu. Pomocí vysoké tepelné vodivosti vodíku je tento efekt, odebrání tepla ještě zesílen. Díky tomu se plazma zúží a zvýší se její teplota a tím i stupeň ionizace a tím i elektrická vodivost. Při kontaktu plazmy se svařovaným materiálem se plazma ochladí a dojde k opačnému pochodu tzv. rekombinaci, kdy dojde ke slučování elektronů s ionty na atomy. Akumulované teplo (disociaci a ionizaci) při rekombinaci se uvolní a přeneše se do materiálu. Taková účinnost tepelného přenosu se pohybuje kolem 65 – 80 %.

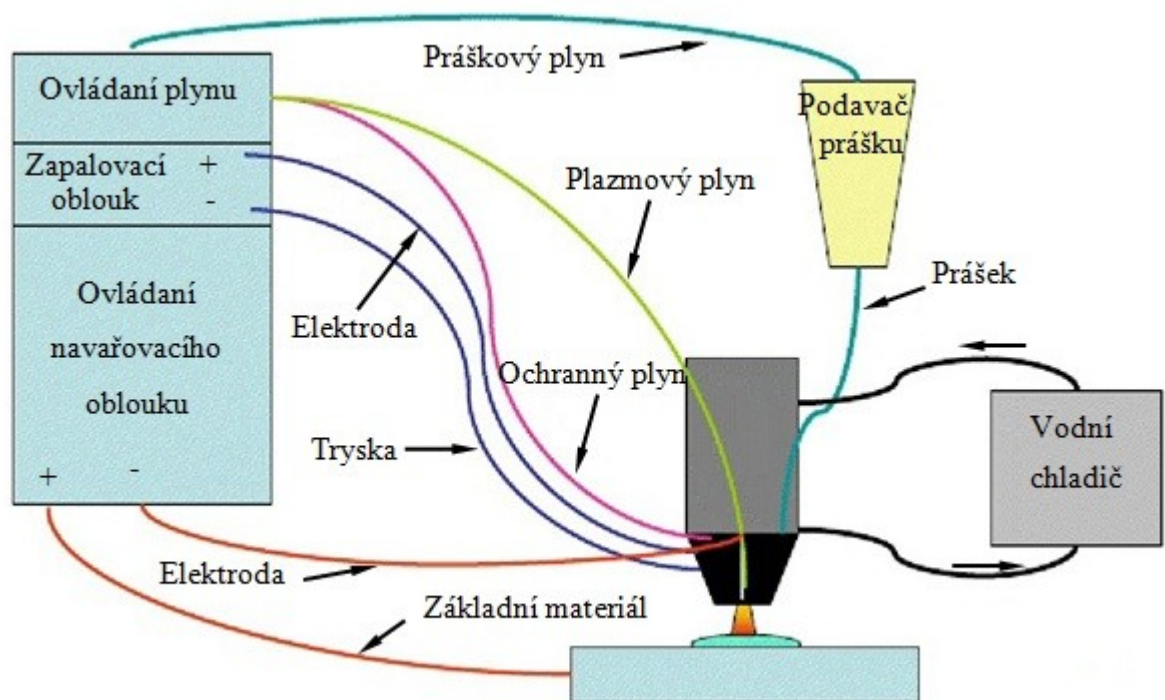
Rychlost plazmového paprsku se docílí díky plynu procházejícímu oblouk, ve kterém mnohonásobně zvětší svůj objem a tím dosáhne rychlost vysokých hodnot. Při navařování musí být vytvořena rovnováha mezi povrchovým napětím návaru a silou vyvolanou dynamickým účinkem (kinetickou energií) tak, aby nedošlo k vyfouknutí návaru. Právě velký dynamický účinek dopadající plazmy spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknout paprsku do materiálu při svařování. Výstupní rychlost plazmy při navařování, ale i při svařování je v rozmezí 200 – 500 m/s<sup>1</sup>.

Použití přídavného materiálu k navařování ve formě prášku je znám již dlouhou dobu. Tato technologie svařování byla vyvinuta na počátku 60 let. Od té doby a zejména v posledních dvou desetiletích se PTA úspěšně používá po celém světě. Používá se především k navařování speciálních materiálů, tímto způsobem se vlastnosti původního materiálu mnohonásobně vylepší.





Obrázek 3 – Popisuje energetické schéma PTA procesu [1].



Obrázek 4 – Schematický popis PTA procesu [1].

Popis jednotlivých částí navařovací technologie PTA je popsána podle literatury [5] a proto se mohou jednotlivé dílčí části lišit od jiných výrobců.

**Hořák** – schéma zapojení vidíme na obrázku 4. Samotný hořák se skládá z:

- upínací jednotka pro katodu
- chladičí a výkon přenášející část
- izolační jednotka s centrovanou elektrodou
- anodová tryska s integrovaným podavačem prášku
- části pro přívod různých druhů plynu
- trubička s práškem od  $\varnothing$  1,5 – 2 mm

**Dodávání prášku** – systém dodávající prášek je kontrolován a regulován pomocí řídicího systému, který zaručuje přísun správného množství přiváděného prášku. Díky této regulaci lze nastavit velikost návarové vrstvy, která je za potřebí a tím se šetří přídavný materiál. Zásobník na prášek obvykle obsahuje 10 kg prášku. Dodávky prášku do hořáku při největších rychlostech navařování se pohybují při 18 kg/h. Velikost (zrnitost) prášku je od 25 do 500  $\mu\text{m}$ .

Systém pro dávkování se skládá z:

- zásobník s práškem
- systém pohonu
- přívod plynu
- podavač prášku
- regulátor množství prášku

Dvojitý systém dávkování prášku je vhodný při navařování různými slitinami s vysokou teplotou tání. Automatický systém podávání prášku se zásobníkem od 250 kg prášku se využívá při sériových výrobach s práškem stejného druhu.

**Zdroj** – nabízí následující vlastnosti

- startovací a pracovní část
- proudovou stabilitu
- frekvenční a pulzní modulaci
- zbytková proudová odchylka 0,2%
- standardní přesnost 0,1% max. proud
- FET tranzistor chlazený vzduchem
- sekundární cyklus zdroje proudu
- všechny parametry jsou nastavitelné

**Chlazení** – pro chlazení se používá dva média a to plyn a chladicí kapalina. Stabilní chlazení je velmi důležité a využívá se uzavřeného okruhu z důvodu zamezení vzniku nečistot a vzniku vodního kamene.

Mezi výhody PTA patří především:

- nízké promísení navařovaného materiálu se základním materiálem
- vysoká rychlost roztavení prášku ve velmi krátkém čase
- velmi využívanou výhodou je také navaření velmi malé vrstvy oproti jiným metodám a také relativně přesná tloušťka vrstvy oproti jiným metodám navařování.
- vysoký objem navařovaného kovu, až 10 kg/h<sup>1</sup>
- velmi vysoká kvalita navařovaného kovu, oproti jiným metodám navařování se téměř neobjevují vady typu póry, rozstřík, vměstky apod.

- je možno navařovat Fe, Ni, Co, Cu slitinami, taktéž kompozitní materiály
- vyšší produktivita a ekonomičnost oproti klasickým metodám navařování

Tyto výhody mají za následek další pozitivní účinky jako kratší čas navařování díky přesné tloušťce vrstvy a tím až enormní úsporu přídavného materiálu [5; 16].

U Stelitu 6 při větším obsahu molybdenu, se tvoří karbidy bohaté na chrom, které vznikají v mezi dendritických oblastech a jejich množství se sníží, ale karbid typu  $M_6C$  vznikající na rozhraní dendritu se zvýšil stejně jako dendrity bohaté na kobalt. Přidáním molybdenu se zlepšila tvrdost a odolnost proti opotřebení u navařování Stelitu 6 pomocí PTA. To ukázalo že, velikost a objemový podíl karbidových částic a dendrity bohaté na kobalt jsou zvláště důležité z hlediska odolnosti proti opotřebení [10].

Stelit 6 byl navařen pomocí PTA na ocel X32CrMoV33 díky této vrstvě bylo docíleno velmi příznivých dopadů na únavu za tepla. Toto výrazné zlepšení je přičítáno vyšší oxidační odolnosti Stelitu 6 a také jeho schopnosti udržet si mechanickou pevnost i při vysokých teplotách. Díky obsahu chromu bylo umožněno vzniku stabilních bohatých chrom oxidu, které se při tepelném namáhání vznikajícím na povrchu neodlupovaly díky své plasticitě. Tlaková a tahová napětí působící na vrstvu byla odhadována na 500 MPa a 170 MPa a nakonec vedly k tepelné únavové trhlině. Jakmile vznikla trhlina tak vliv mikrostruktury na postup růstu trhliny byl minimální [11].

Stelit 6 je slitina kobaltu jako základ, která je odolná proti opotřebení a korozi a zachovává si tyto vlastnosti i při vysokých teplotách. Tyto vlastnosti dosahuje především díky tvrdým karbidům rozptýlených v Co-Cr matrici. Stupeň ředění je v tomto ohledu velmi důležitý. Aby byly zachovány pozitivní vlastnosti návarové vrstvy je nutno zabránit velkému zředění jako například použití vhodné metody navařování, ale i správnou volbu velikosti navařovacích parametru. V tomto smyslu je zásadní, že zvýšení proudu vede k zvýšení ředění a naopak [12].

Byly provedeny také zkoušky na vliv pulzního proudu při navařování metodou PTA a to směsí s vysokým obsahem kobaltu na uhlíkovou a vysoce legovanou ocel. Bylo zjištěno, že použití pulzního proudu vede k jemnější mikrostruktuře, nižšímu stupni ředění, k homogennějšímu zředění struktury a vyšší tvrdosti. Tvrdost návaru byla vyšší na uhlíkových ocelích než na vysokolegovaných ocelích. Při zvýšení proudu je dosaženo většího ředění a nižší tvrdosti [13].

Omezení trhlin u laserového navařování Stelitu 1 ukázala numerická analýza, že přehřev pomáhá při stabilizaci teploty tání a hlavně omezuje vznikající tepelné namáhání během navařovacího procesu. Analýza mikrostruktury ukázala silnější průřez s hladším povrchem a rovnoměrnější tvrdost povrchu. Mikrostruktura bez přehřevu byla značně nerovnoměrná. Experimentální měření ukázalo, že přehřátý vzorek má rovnoměrnější strukturu a je méně náchylný ke vzniku trhlin během navařování díky větší rovnoměrnosti rozložení teploty ve vzorku [14].

Tradiční Stelitové materiály jsou podle velikosti chemických prvků složeny z Co-Cr-W-C některé nové slitiny jsou na bázi Co-Cr-Mo-C. Díky nahrazení W pomocí Mo bylo docíleno zvětšení podílu karbidu v mikrostruktuře než u Stelitu s obsahem W. Velké množství karbidu ve struktuře, větší tvrdost a také větší modul pružnosti v tahu (tzv. Younguv modul), jsou důležité pro odolnost proti opotřebení. U těchto dvou typů Stelitu byly podrobeny zkoušky a to v 10% roztoku  $\text{HNO}_3$  při teplotě varu, v 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  při teplotě  $66^\circ\text{C}$  a nakonec v 5%  $\text{HCL}$  při teplotě  $40^\circ\text{C}$ . Stelity s obsahem W mají lepší odolnost proti korozi v kyselinách s velkým oxidačním činidlem. Stelity s obsahem Mo vynikají svou vynikající odolností proti opotřebení a odolností proti korozi v redukčním prostředí [15].

Byly provedeny zkoušky odolnosti proti kavitační erozi u Stelitu 6 a nerezové oceli. Nerezová ocel byla svým chemickým složením téměř totožná s ocelí X3CrNiMo13-4 až na velikost obsahu Manganu, kterou měla testovaná ocel o 1% menší. Kavitační odpor byl měřen podle ASTM G32. Testování bylo prováděno s vysokou rychlostí dopadu kapek vody pod různými úhly. Největší úbytek materiálu bylo dosaženo při dopadu pod úhlem  $45^\circ$  u obou zkoušených materiálů a nejmenší úbytek byl naměřen u Stelitu 6. Bylo zjištěno že Stelit 6 má oproti nerezové oceli o 7x menší maximální rychlost eroze. Potřebný čas k dosažení maximální rychlosti eroze u Stelitu 6 byl oproti nerezové oceli 8x menší. Byl zjištěn také důležitý poznatek a to že Stelit 6 má 15x větší odolnost proti kavitační erozi než nerezová ocel popsána v tomto odstavci [19].

Pomocí PTA byly navařeny Co-Cr-W slitiny. U jednoho vzorku bylo provedeno umělé stárnutí při  $600^\circ\text{C}$  po dobu 60h. Na obou vzorcích byla následně provedena zkouška mikrotvrdosti, dále bylo provedeno hodnocení mikrostruktury a zkouška na odolnost proti opotřebení. Z výsledků vyplývá, že vzorek, který byl vystaven umělému stárnutí, měl větší

hodnoty mikrotvrdosti při zhrubnutí zrna a horší odolnost proti opotřebení. Příčina zvýšení mikrotvrdosti byla v precipitaci  $M_{23}C_6$  [20].

Na ventilech z materiálu X40CrSiMo10-2 byly pomocí metody PTA a laserového navařování označovaného jako LPS (laser powder surfacing), navařeny tři druhy kobaltových prášku. Obě testované technologie měly vysoce kvalitní povrch navařované vrstvy. U LPS bylo zjištěno, že zaručuje vyšší přesnost kontroly tepelného příkonu a tím kvalitnější návar. Dále bylo zjištěno, že technologie LPS vytvoří návar o tvrdosti 485 – 615 HV a technologie PTA 365 – 460 HV [21].

K návaru z přídavného materiálu Stelit 21 byl přidán chemický prvek Yttrium. Legováním Yttriem bylo dosaženo výrazné zvýšení mechanických vlastností oxidu a jejich zlepšení přilnavosti k podkladu. V oxidech se tvořily  $Y_2O_3$  fáze. Přítomnost Yttria zejména při úrovni 0,5% výrazně posílily odolnost proti opotřebení při teplotách vyšších než 500°C [22].

Metodou PTA byly navařovány různé typy Stelitu. U Stelitu 6 bylo prokázáno, že odolnost proti opotřebení bylo zlepšeno přidáním chrom karbidových částic do matrice. Tuhý roztok posílen o chrom karbidovou fází byl hlavním faktorem při zvýšení odolnosti proti opotřebení při vyšší teplotě [23].

## 5 Postup navařování

Jelikož se jedná o navařování různých materiálu s odlišnými hodnotami tvrdosti, bylo hlavním cílem navrhnout vhodný technologický postup navařování a navrhnout vhodné parametry navařování tak, aby došlo k co nejpozdnějšímu přechodu tvrdosti ze Stelitu do základního materiálu. Technologický postup a parametry navařování byly navrženy podle zkušeností z praxe. Navařování probíhalo bez předehřevu a dohřevu. Po navařování nebylo aplikované žádné tepelné zpracování. Navařování bylo prováděno na čtyřech vzorcích o rozměrech  $\varnothing 70 \times 60$  [mm].

## 5.1 Základní materiál

Základní materiál podle ČSN EN 10027-1 byl S 355 J2G3 a podle normy ČSN 42 0002 se jednalo o 11 523. Tato nelegovaná konstrukční jemnozrnná ocel, která je vhodná pro svařování se používá u konstrukcí pracujících za běžných atmosférických teplot, za snížených teplot i za zvýšených teplot. Ocel se používá jako součást strojů, automobilu, motocyklu a jízdních kol. Využívá se u tepelných energetických zřízení a také jako součást tlakových nádob.

Tabulka 12 – Chemické složení v % ocele S 355 J2G3 podle programu Lexikon technických materiálů 4.0

C	Mn	N	P	S	Si
≤ 0,2	≤ 1,6	≤ 0,009	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,55

## 5.2 Mezivrstva

Přechodová mezivrstva, která má zmírnit ostrý přechod tvrdosti v oblasti návar – základní materiál, byla vytvořena pomocí technologie žárového nástřiku. Jedna se o vysokorychlostní nástřik plamenem pod označením HVOF. Mezivrstva byla vytvořena ze slitiny NiAl o tloušťce cca. 0,1 mm. Podmínky pro zhotovení mezivrstvy jsou vedené v [25].

## 5.3 Návar Stelitu 6

Návarová vrstva Stelitu 6, byla provedena na čtyřech shodných vzorcích. Přídavný materiál ve formě prášku měl chemické složení podle tabulky 13. Návary byly provedeny na PTA Castolin Eutronic 200/400 s parametry v tabulce 14.



Tabulka 13 – Chemické složení Stelitu 6 [1].

	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Ostatní
Stellite 6	28,5	4,6	1,2	< 2	< 1	< 2	< 2	< 1

Tabulka 14 – Navařovací parametry a další důležité hodnoty [25].

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
Svařovací proud [A]	100	90	120	105
Svařovací rychlost [cm/min]	3,5	4,5	4,5	5
Plazmový plyn Ar [l/min]	3	3	3	3
Ochranný plyn Ar/H <sub>2</sub> [l/min]	7	7	7	7
Boční výkyv [mm]	2	2	2	2
Množství prášku [kg/h]	2	1,5	2	1,5

## 6 Výsledky metalografických zkoušek

Hodnoceny byly zkušební vzorky a to na vizuální kontrolu, makrotvrdotost HV 5 a makrostrukturu. U dvou nejlepších vzorků byly následně provedeny zkoušky na mikrotvrdotost na HV 0,1 a provedeny rozborů mikrostruktury.

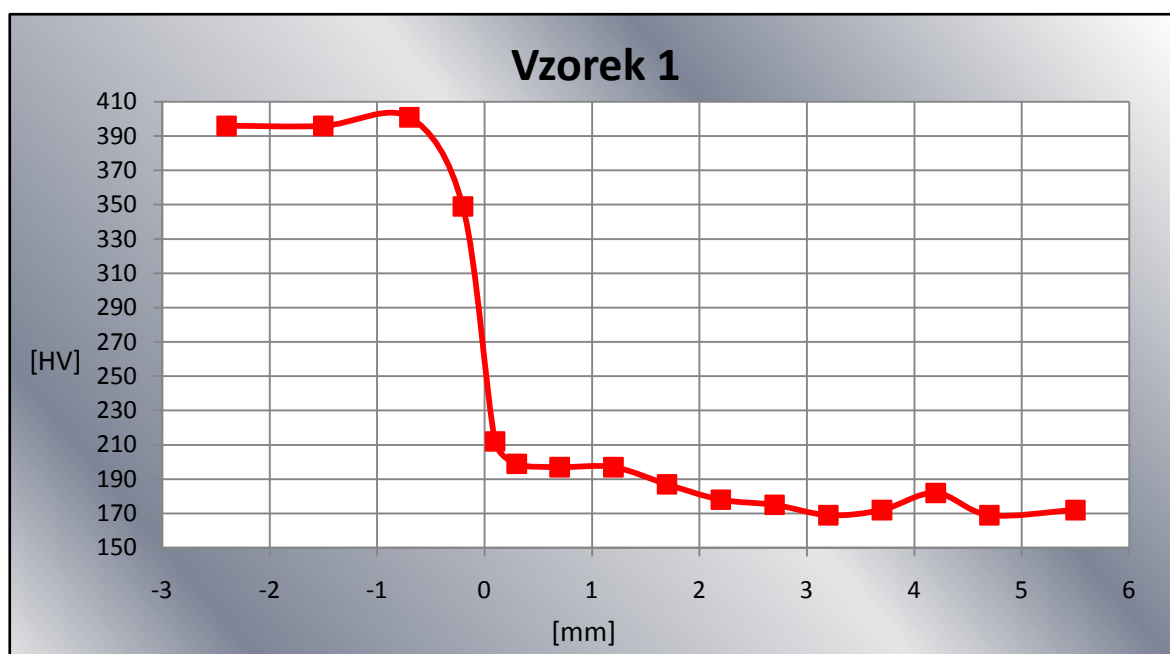
Při vizuální kontrole byla zjištěna trhlina u vzorku č. 4, který je na obrázku 13. Tato vada je nepřijatelná, ale i tak byl tento vzorek podroben makrotvrdotosti a bylo provedeno hodnocení makrotvrdotosti. Vzorky číslo 1, 2 a 3 byly po stránce vizuální kontroly vyhovující.

## 6.1 Makrostruktura a makrotvrdost

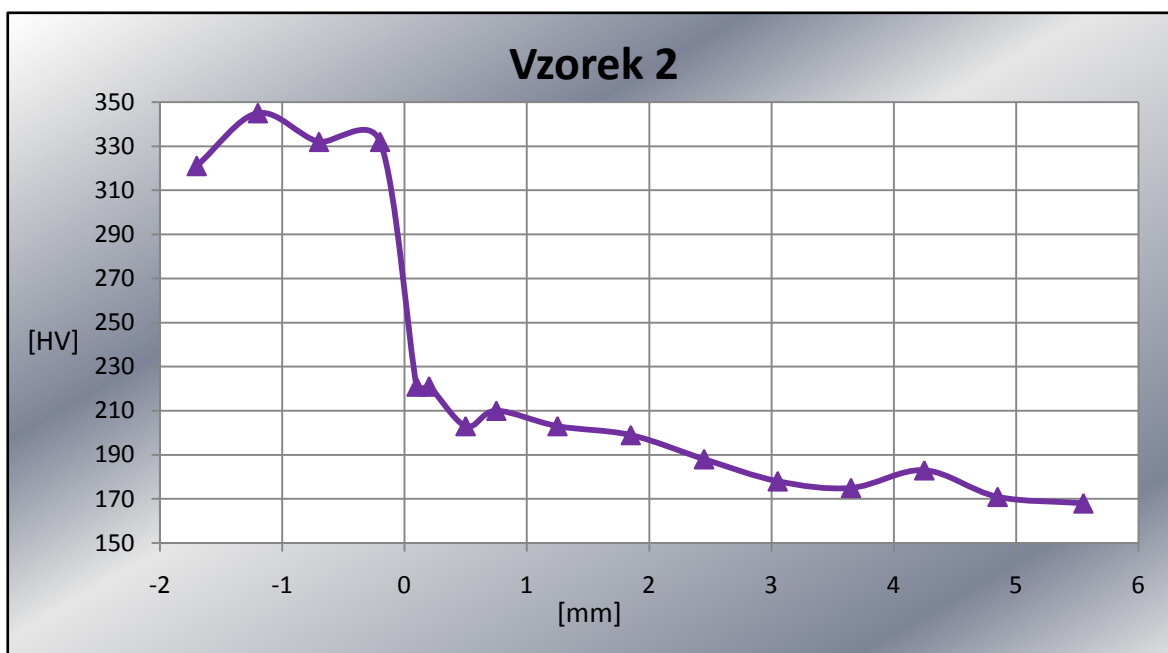
Jednotlivým zkouškám předcházely přípravy, ty budou popsány v jednotlivých podkapitolách. Všechny práce jak přípravné tak měření jednotlivých veličin byly prováděny v laboratořích VŠB-TU Ostrava.

### 6.1.1 Hodnocení makrotvrdosti

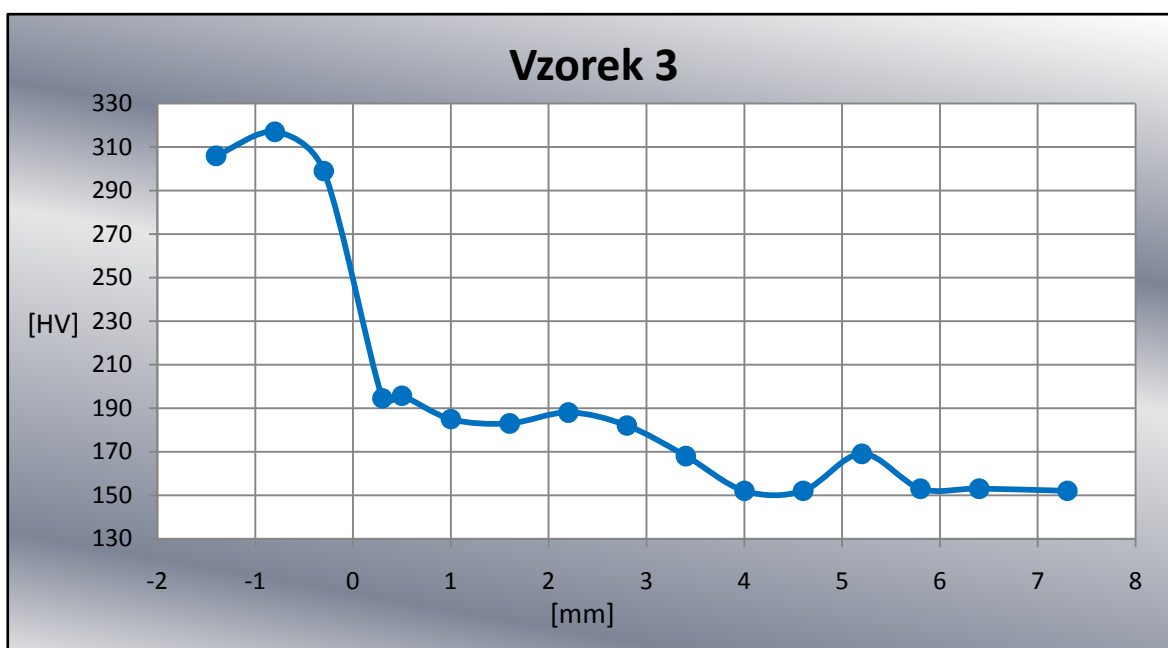
Přípravné práce k makrotvrdosti předcházely tyto práce. Dělení materiálu řezným kotoučem, broušení až po brusný papír hodnoty 500 za pomoci vybavení STRUERS. Měření tvrdosti podle ČSN EN ISO 9015-1 na HV 5 bylo provedeno na přístroji CARL YEISS JENA, WPM. Celý průběh tvrdosti jednotlivých vzorku jsou na obrázcích 5 až 8.



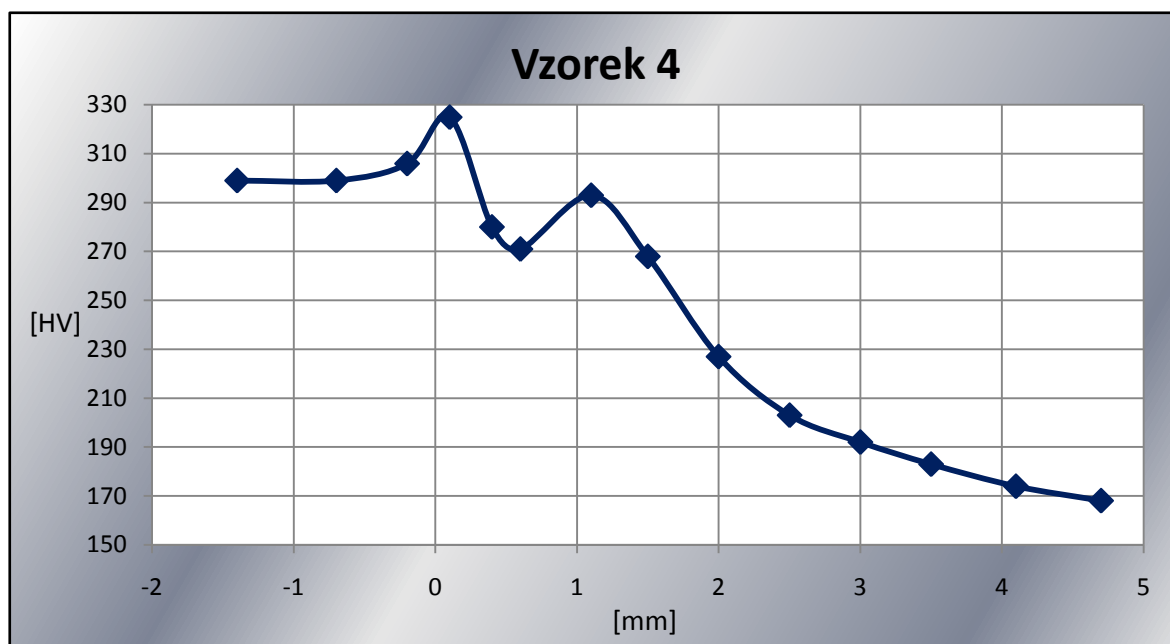
Obrázek 5 – Průběh tvrdosti vzorku 1



Obrázek 6 – Průběh tvrdosti vzorku 2

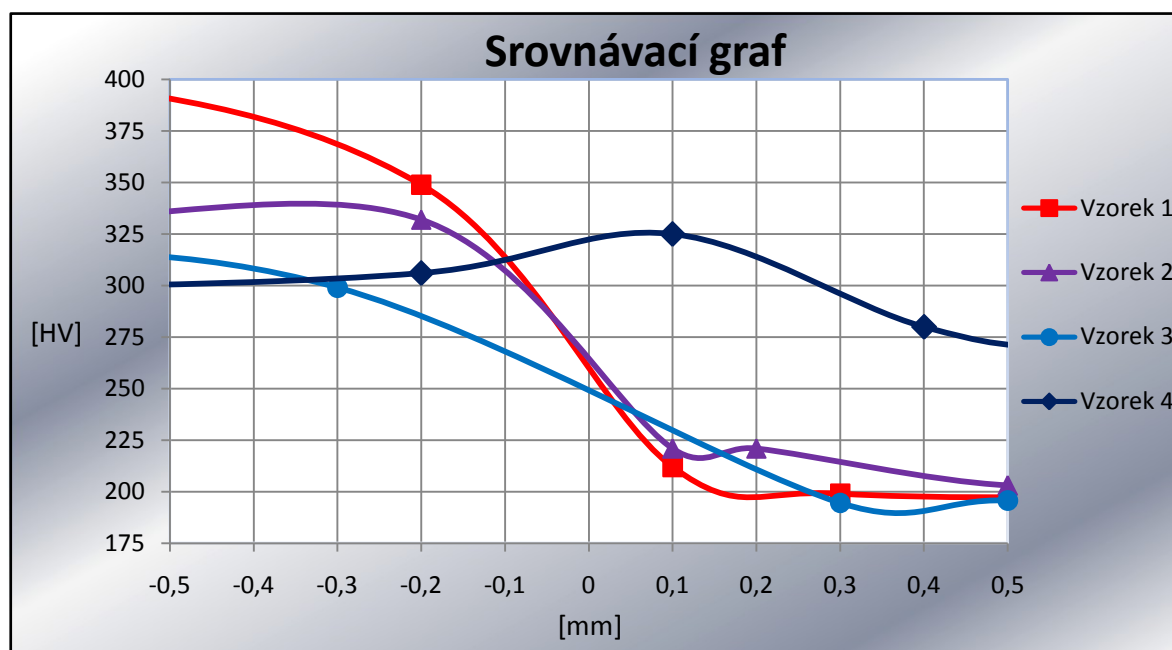


Obrázek 7 – Průběh tvrdosti vzorku 3



Obrázek 8 – Průběh tvrdosti vzorku 4

Hodnota 0 mm vyznačuje hranici návar – základní materiál. Kladné hodnoty označují oblast základního materiálu a hodnoty záporné pak navařený materiál. Konec TOO u grafu průběhu tvrdosti je mezi posledním a předposledním bodem, kromě vzorku 1 kde je konec TOO za posledním bodem ve vzdálenosti cca. 2 mm.



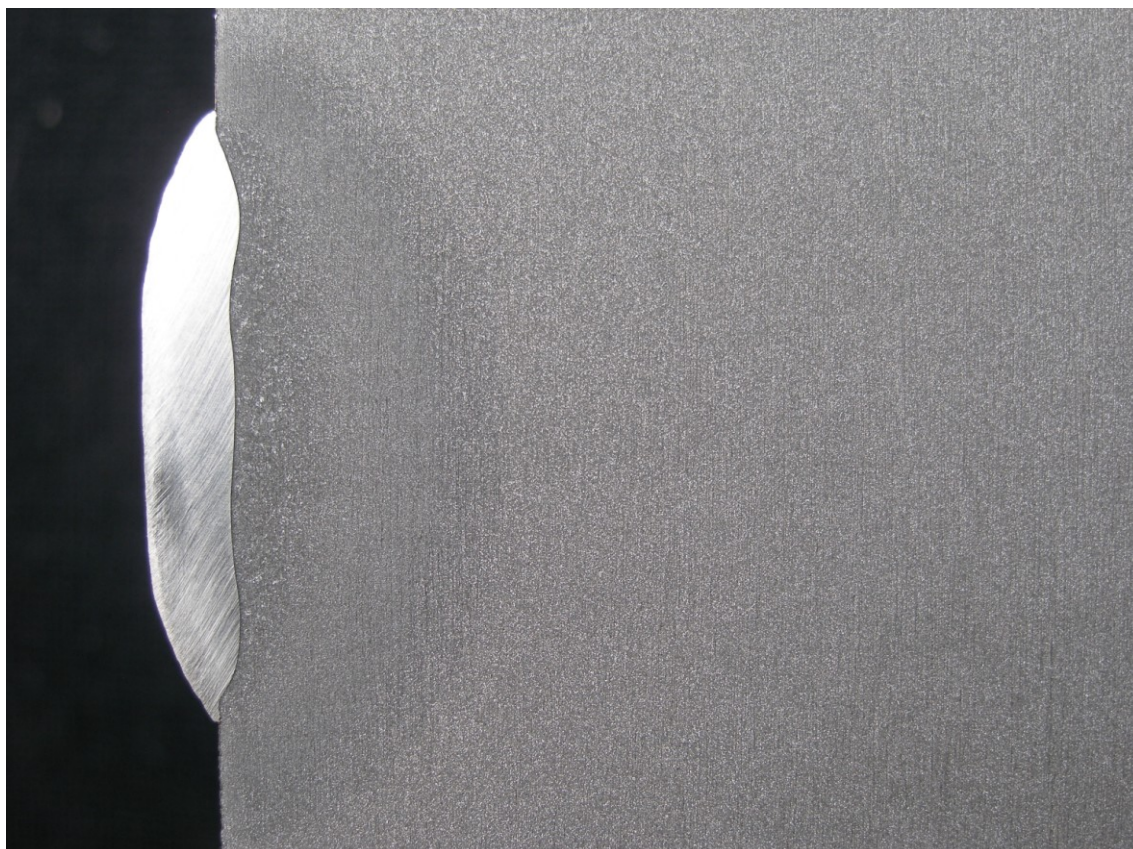
Obrázek 9 – Srovnávací graf tvrdosti jednotlivých vzorků

Srovnávací graf uvádí jednotlivé vzorky, v oblasti přechodu navařený materiál a základní materiál. Jako již v podkapitole 6.1.1 i zde hodnota 0 mm označuje hranici návar – základní materiál. Dále pak kladná hodnota označuje oblast základního materiálu a hodnota záporná navařený materiál.

Hodnocením makrotvrdosti nejlépe vyhovuje vzorek číslo 3 u, kterého vidíme nejmírnější přechod tvrdosti v oblasti návar – základní materiál.

### 6.1.2 Hodnocení makrostruktury

Přípravné práce k hodnocení makrostruktury předcházely tyto práce. Broušení a leštění pomocí vybavení STRUERS. Leptání bylo provedeno díky 10% HCl podle literatury [8]. Focení makroskopické oblasti bylo provedeno za pomoci vybavení Olympus C-7070.



Obrázek 10 – Snímek vzorku číslo 1 při 3,5x zvětšení





Obrázek 11 – Snímek vzorku číslo 2 při 3,7x zvětšení



Obrázek 12 – Snímek vzorku číslo 3 při 3,1x zvětšení





Obrázek 13 – Snímek vzorku číslo 4 při 4,1x zvětšení

Na obrázcích s makrostrukturou vidíme jednovrstvé, homogenní návary s TOO. Tyto návary jsou bez trhlin, kromě vzorku číslo 4. Hodnocení makrostruktury vyhovují vzorky číslo 1, 2 a 3.

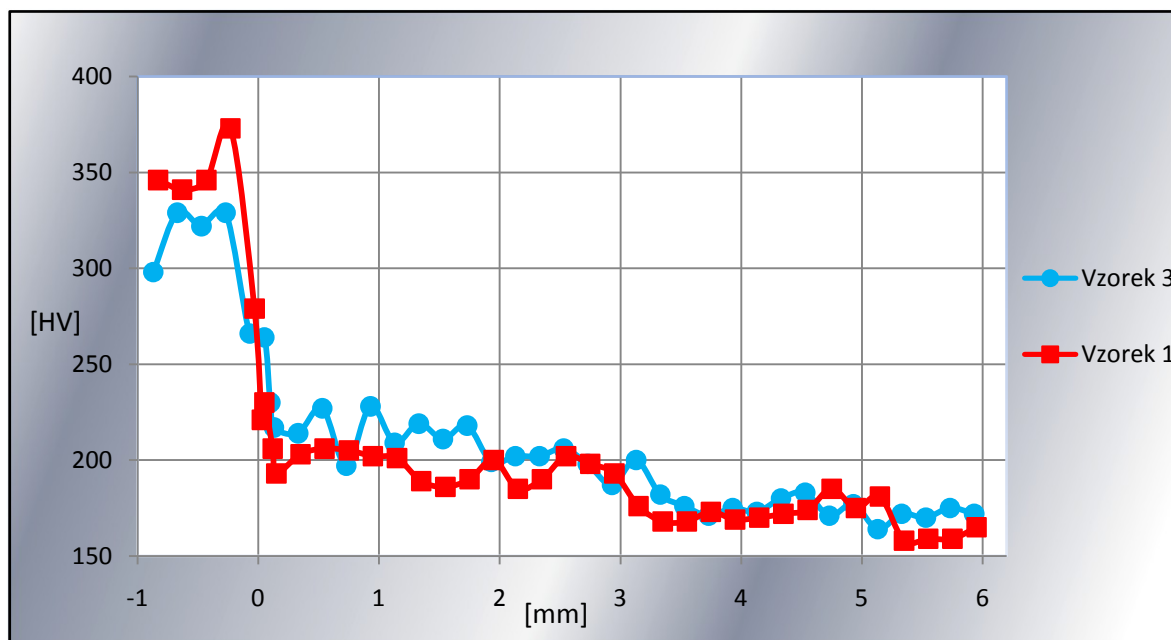
## 6.2 Mikrotvrdost a mikrostruktura

Pro další hodnocení byly vybrány nejlépe vyhovující vzorky a to vzorek 1 a 3. Limitujícím kritériem pro hodnocení vzorku 4 na mikrotvrdost a mikrostrukturu byla trhlina, která není přípustná.

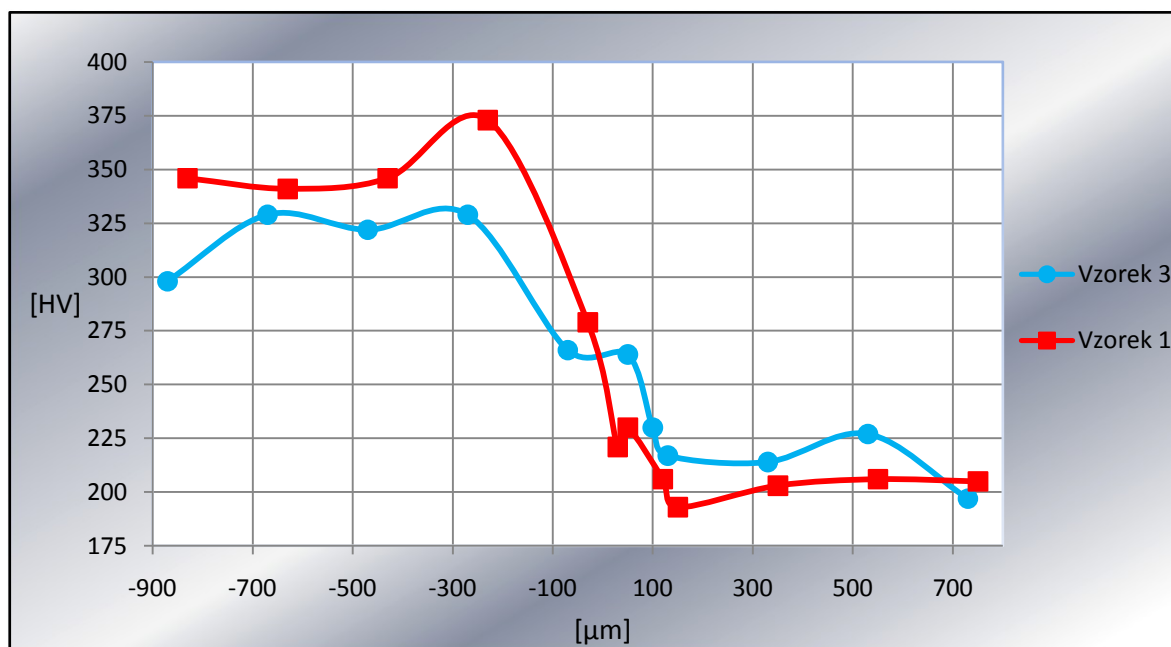
### 6.2.1 Vyhodnocení mikrotvrdosti

Příprava probíhala za pomoci dělení materiálu řezným kotoučem, preparace, zalévání za tepla a tlaku, broušení až po brusný papír hodnoty 2400 a leštění pomocí vybavení STRUERS. Měření mikrotvrdosti podle ČSN EN ISO 9015-2 na HV 0,1 po krocích  $L =$

0,2 mm. Použití měřidla LECO LM 247 AT za PC podpory AMH 43 (automatický mikrotvrdměř).



Obrázek 14 – Srovnání mikrotvrdosti



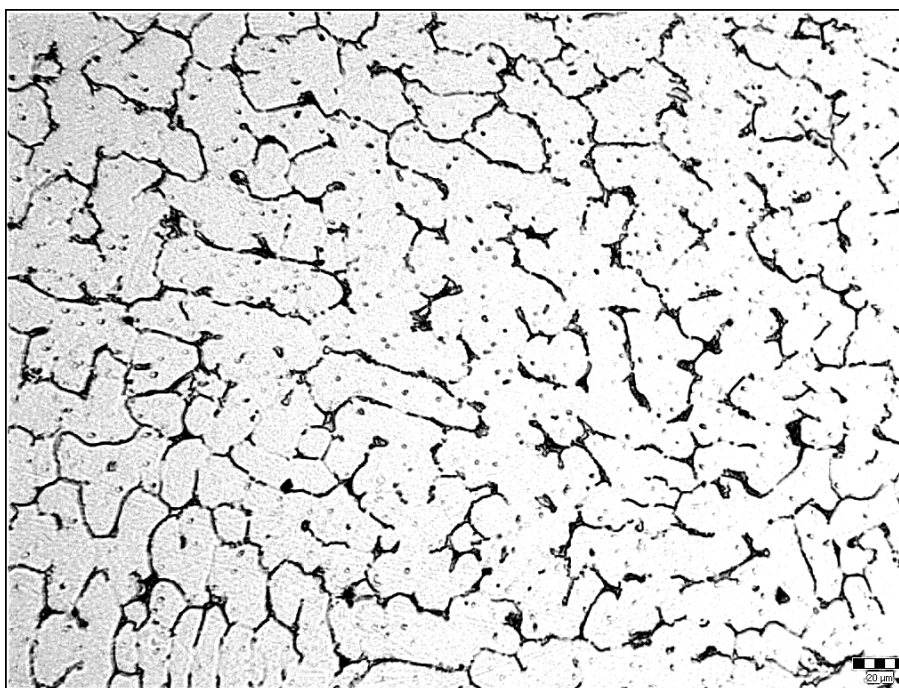
Obrázek 15 – Detailnější srovnání mikrotvrdosti



Hodnota 0  $\mu\text{m}$  vyznačuje hranici návar – základní materiál. Ze vzorku je nejmírnější přechod tvrdosti u vzorku číslo 3, a proto je tento vzorek z hlediska hodnocení mikrotvrdosti nejlepší. Tvrdost odpovídá literatuře [1].

### 6.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury

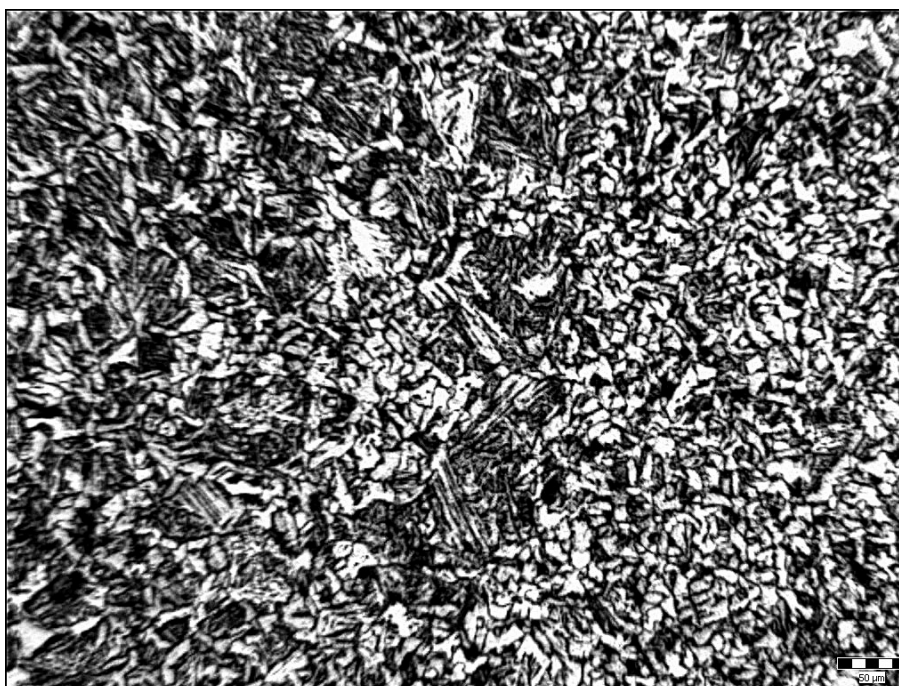
Leptání základního materiálu bylo za pomoci Nitalu, leptání Stelitu 6 za pomoci Vilella podle literatury [8]. Mikroskopické hodnocení za pomoci vybavení Neophot 21 za PC podpory QUICK PHOTO INDUSTRIAL 2.2.



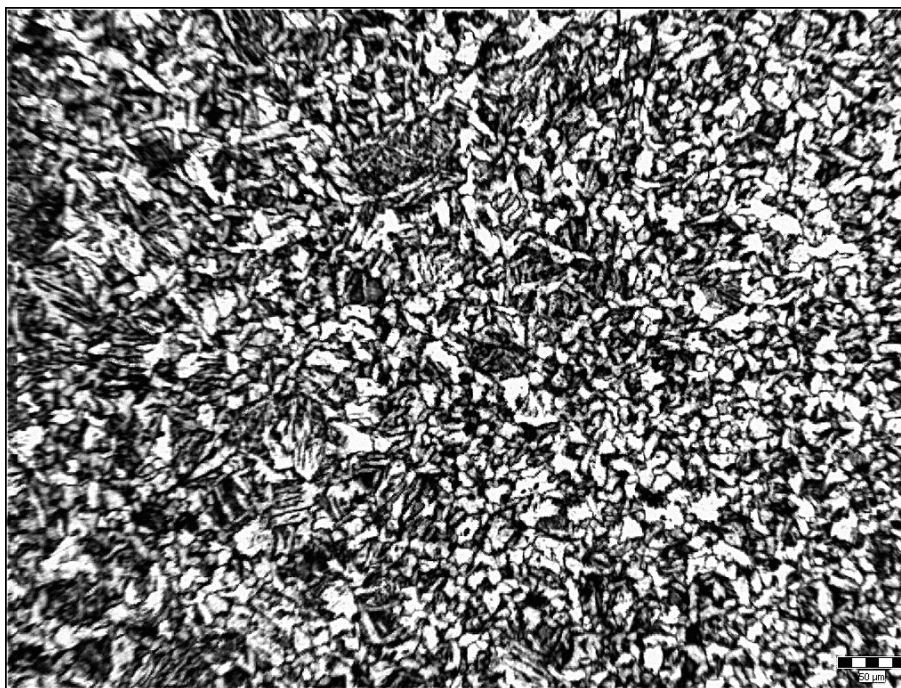
Obrázek 16 – Vzorek 3 Stelit a karbidy 200x zvětšeno



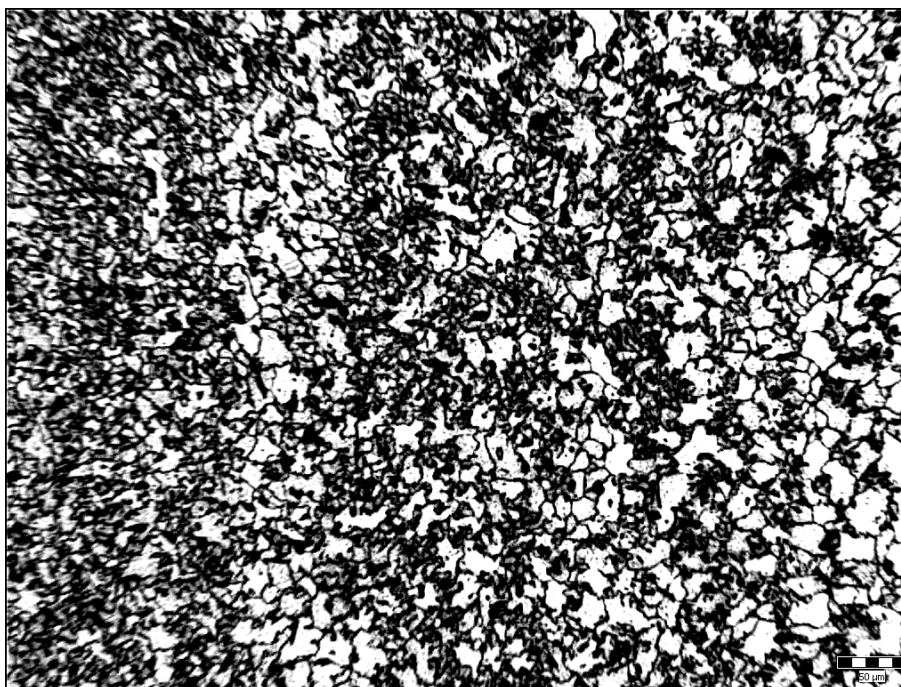
Obrázek 17 – Na vzorku 3, který je 100x zvětšen vidíme úzké pásmo ztavení, které vzniká při teplotě nad  $T_s$ . Uprostřed snímku sledujeme hrubozrnnou feritickou strukturu s feritickým síťováním, která se tvoří při teplotě nad  $T_p$ . Ferit je vyloučený po hranicích původního austenitického zrna.



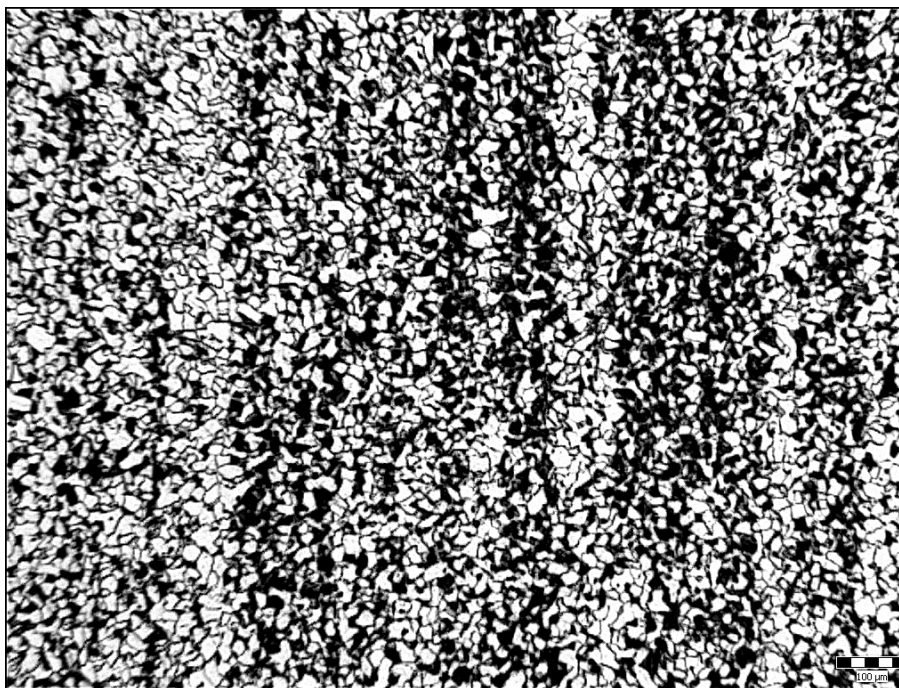
Obrázek 18 – Překrystalizace zrna perlitu při teplotě nad  $T_p$  u vzorku 3 a 100x zvětšeno. Napravo již sledujeme začínající stejnoměrnou perlitickou strukturu v pásmu normalizace, která se tvoří mezi teplotami  $T_p - A_{c3}$ .



Obrázek 19 – Překrystalizace zrn perlitu v pásmu normalizace u vzorku 3, které je 100x zvětšeno.



Obrázek 20 – Perliticko – feritická struktura s řádkovitostí perlitu na vzorku 3, který je 100x zvětšen.



Obrázek 21 – Rovnoměrná perlitická struktura s řádkovitostí perlitu s vyloučenými karbidy na vzorku 3, který je 100x zvětšen.

Do této kapitoly byly zařazeny jen snímky mikrostruktury ze vzorku 3. Z důvodu velkého množství jsou ostatní snímky vzorku 3 a všechny snímky vzorku 1 i s krátkým popisem zařazeny do přílohy. V hodnocených mikrostrukturách se neobjevily nevyhovující struktury, ani orientace směru dendritu není riziková. Z hlediska hodnocení mikrostruktury jsou proto oba vzorky vyhovující. Jednotlivé struktury odpovídají literatuře [8; 10; 13; 23].

## 7 Závěr

Diplomová práce se zabývá návaru Stelitu pomocí technologie PTA. V teoretické části se zabývá studiem vlastností a použití materiálu typu Stelit se zaměřením na nejpoužívanější Stelit 6. Teoretická část obsahuje také rozbor vhodných technologií navařování pro tento materiál. Tímto rozbohem se usnadní správná volba technologie navařování pro danou součást s vhodným typem Stelitu.

Velká část diplomové práce je věnována popisu samotné navařovací metodě PTA. Samotné navařování Stelitu metodou PTA je pak rozšířeno o jednotlivé závěry z odborných publikací. Díky těmto postupům je možno docílit lepších vlastností navařené vrstvy.

V experimentální části byly navrženy vizuální a metalografické zkoušky, které měly mezi sebou porovnat čtyři vzorky. Vzorky měly shodný základní materiál S 355 J2G3, shodnou mezivrstvu NiAl. Lišily se jen parametry navařovací technologie PTA. Hodnocení vizuální zkoušky nevyhověl vzorek č. 4, který obsahoval trhlinu. Hodnocením makrotvrdostí a makrostruktury nejlépe vyhověl vzorek č. 3. Při hodnocení mikrostruktury byly hodnoceny už jen vzorky 1 a 3. Hodnocením mikrostruktury byly oba vzorky vyhovující. Hodnocením průběhu mikrotvrdosti nejlépe vyhověl vzorek č. 3. Z celkových výsledků vyplývá, že vzorek č. 3 byl vyhodnocen jako nejlepší.

Jedním z problému při navařování Stelitu je velmi ostrý přechod tvrdosti v oblasti návar – základní materiál. Tato skutečnost může vést při nepříznivých podmínkách zatížení až k porušení (vzniku trhliny) v oblasti návar – základní materiál a vést k „odlupování“ navařené vrstvy. Tento nepříznivý stav by řešil postupný přechod tvrdosti od návaru do základního materiálu. Toto je možné docílit díky návaru o několika vrstvách. Tento způsob není možné vždy použít s ohledem na použité tloušťky jednotlivých vrstev a členitosti povrchu. U vícevrstvého návaru je také zapotřebí řešit opracování, což snižuje produktivitu.

Možným řešením je vytvoření tenké přechodové vrstvy jinou technologií, která se nanese mezi vrstvu návaru pořízenou technologií PTA a základním materiálem, což je zcela nový přístup. Tato přechodová mezivrstva byla vytvořena žárovým nástřikem, který umožňuje zhotovit vhodnou tloušťku mezivrstvy. Touto technologií je možné vytvořit mezivrstvu i na členitém povrchu bez nutnosti opracování. Jako mezivrstva byla použita

slitina NiAl o tloušťce cca. 0,1 mm. Pro danou kombinaci materiálu, členitost povrchu, požadavky na kvalitu mezivrstvy se jevila jako velmi vhodná technologie žárového nástřiku HVOF. Na této mezivrstvě byl vytvořen návar technologií PTA.

Hlavním cílem popsaným v úvodu bylo stanovit vzorek, který má nejmírnější přechod tvrdosti v oblasti návar – základní materiál. Tímto kritériem nejlépe odpovídá vzorek č. 3. Dalším cílem bylo dosažení návaru bez vměstku, trhlin, zápalu, póru apod. Tento cíl splňovaly vzorky č. 1, 2 a 3. Důležitým cílem bylo docílení příznivé mikrostruktury, tohoto cíle bylo dosaženo u všech zkoumaných vzorků.

Děkuji Ing. V. Ochodkovi. z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za podněty k řešení práce a za poskytnutí nejnovější odborné literatury, paní Ing. X. Ševčíkové z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za metodickou pomoc při metalografických zkouškách.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] *Kennametal Stellite* [online]. 2012 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://www.stellite.com/>
- [2] MOHYLA, Miroslav. *Strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003, 144 s. ISBN 80-248-0270-8.
- [3] SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura a vlastnosti kovových materiálů*. Ostrava: Kovosil, 2004. ISBN 80-901157289.
- [4] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133 s. ISBN 978-80-248-0870-3 (DOTISK : BROŽ.).
- [5] PTA - Welding Systems. In: *Industrial motion systems* [online]. 09/2001 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.industrialmotionsystems.com>
- [6] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování a zařízení*. Plzeň: Škoda welding, 2011.
- [7] *Svět svaru: časopis o moderních trendech a technologiích ve svařování a řezání kovů* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2012-04-14]. ISSN 1214-4983. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/issue/SS05-2.pdf>
- [8] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu 2*. 2. svazek. Praha: ČSAV, 1959.
- [9] HARDFACING CONSUMABLES. [online]. s. 24 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.stellite.de/Portals/0/Downloads/Consumables%20english.pdf>
- [10] Surface and Coatings Technology: Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys [online]. ELSEVIER, 2003, s. 117-126 [cit. 2012-04-29].
- [11] Materials Science and Engineering A: Thermal fatigue testing of Stellite 6-coated hot work tool steel [online]. ELSEVIER, 2010, s. 6091-6097 [cit. 2012-04-29].
- [12] Journal of Alloys and Compounds: Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM. [online]. ELSEVIER, 2012, s. 71-77 [cit. 2012-04-29].



- [13] Journal of Materials Processing Technology: Pulsed current plasma transferred arc hardfacing [online]. ELSEVIER, 2006, s. 167-174 [cit. 2012-04-30].
- [14] Applied Surface Science: Impact of localized surface preheating on the microstructure and crack formation in laser direct deposition of Stellite 1 on AISI 4340 steel [online]. ELSEVIER, 2010, s. 1716-1723 [cit. 2012-04-30].
- [15] Materials Science and Engineering A: Wear, corrosion and cracking resistance of some W- or Mo-containing Stellite hardfacing alloys [online]. ELSEVIER, 2005, s. 234-244 [cit. 2012-04-30].
- [16] BYTOMSKÝ, Petr. *Provádění návarů typu STELLIT 6 na těsnící prvky šoupátek S43 zhotovených z oceli 15NiCuMoNb5-6-4*. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
- [17] Ador Fontech Limited. [online]. 2005 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.adorfon.com/products/fma/pdfs/stellite6.pdf>
- [18] ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [19] Tribology International: Cavitation and high-velocity slurry erosion resistance of welded Stellite 6 alloy [online]. ELSEVIER, 2012, s. 16-24 [cit. 2012-05-06].
- [20] Surface & Coatings Technology: Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing [online]. ELSEVIER, 2005, s. 238-243 [cit. 2012-05-06].
- [21] Journal of Materials Processing Technology: The study of the technology of laser and plasma surfacing of engine valves face made of X40CrSiMo10-2 steel using cobalt-based powders [online]. ELSEVIER, 2006, s. 251-256 [cit. 2012-05-06].
- [22] Wear: Tribological behavior of Stellite 21 modified with yttrium [online]. ELSEVIER, 2004, s. 1154-1166 [cit. 2012-05-07].
- [23] Wear: On the wear behavior of surface clad layers under high temperature [online]. ELSEVIER, 1999, s. 1114-1122 [cit. 2012-05-07].

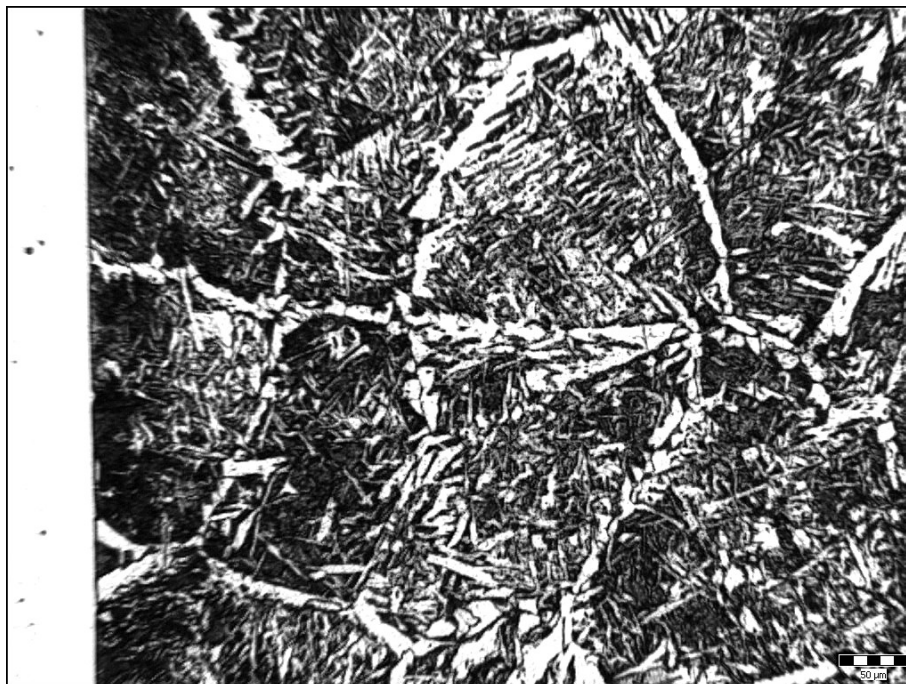
[24] Wikipedia: Otevřená encyklopedie. *Stellite* [online]. 16.3.2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stellite>

[25] OCHODEK VL. Ověření zhotovení gradientové mezivrstvy žárovými nástřiky-osobní sdělení. VŠB TUO, únor 2012.

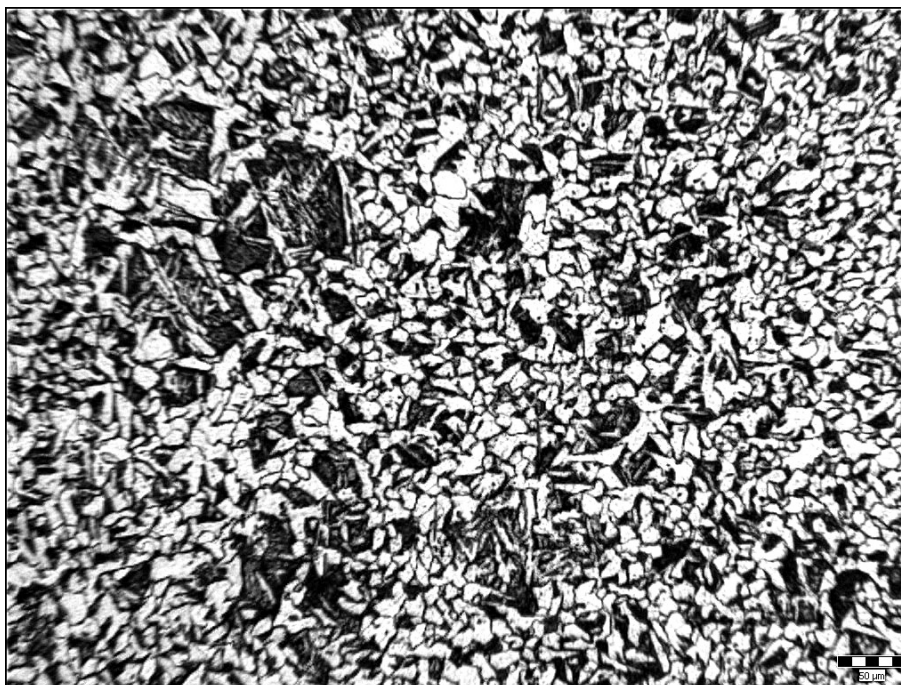
## **9 Seznam příloh**

Příloha A - Snímky mikrostruktury u vzorku č. 1 a 3

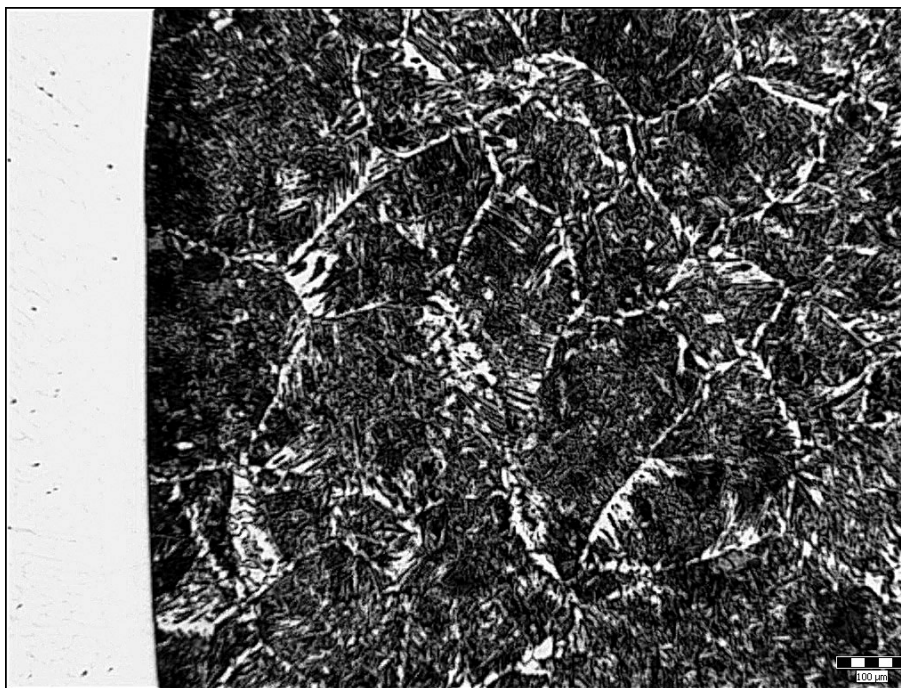
## Příloha A



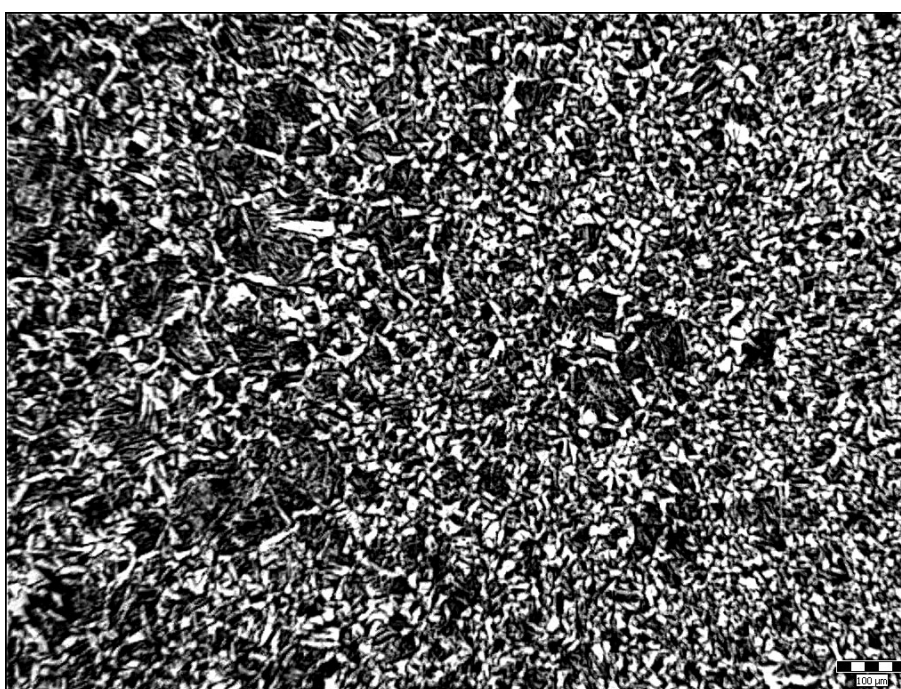
Vzorek 1 hrubozrnná feritická struktura s feritickým síťováním 100x zvětšeno.



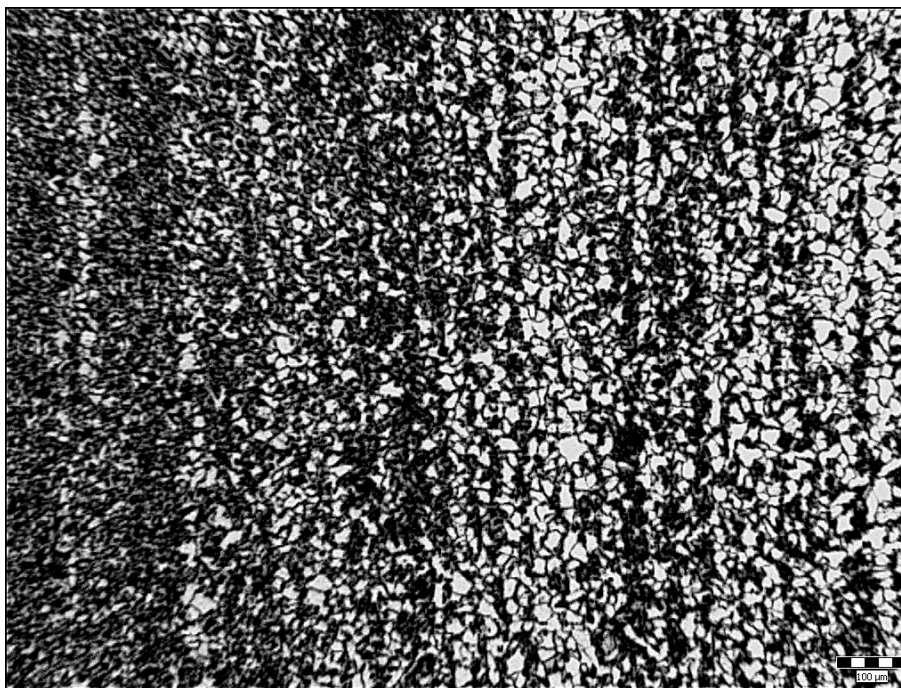
Vzorek 1 překrystalizace zrn perlitu 100x zvětšeno



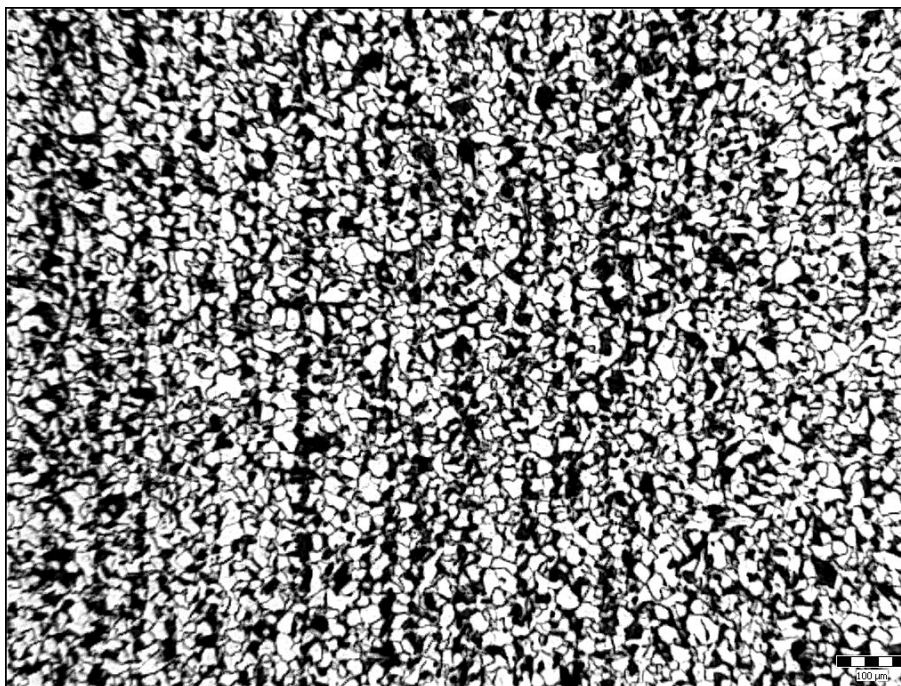
Vzorek 1 hrubozrnná feritická struktura s feritickým síťováním 50x zvětšeno.



Vzorek 1 překrystalizace zrn perlitu 50x zvětšeno

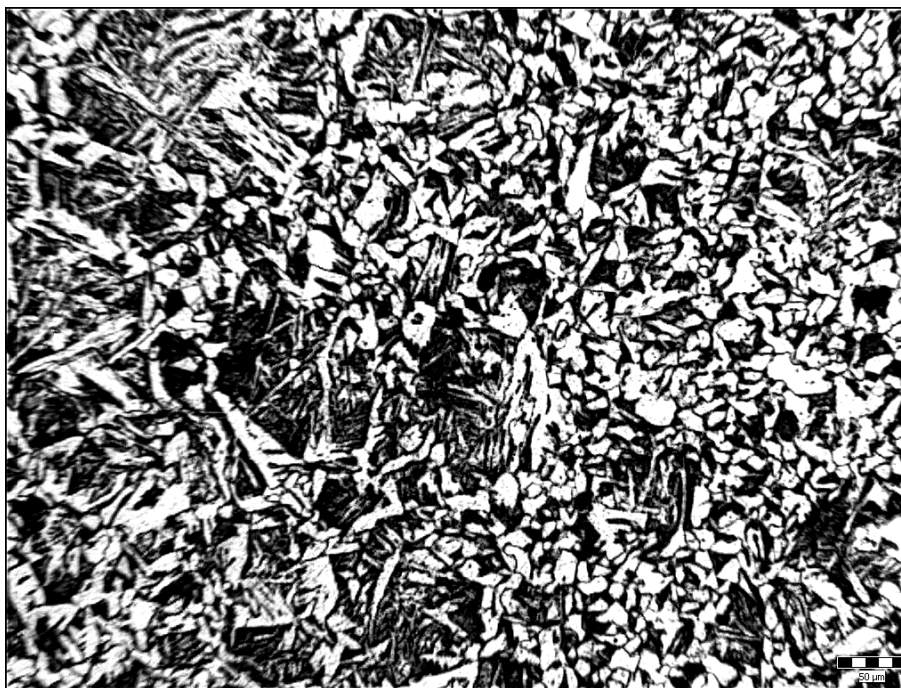


Vzorek 1 perliticko-feritická struktura, perlit vyloučen v řádcích 50x zvětšeno

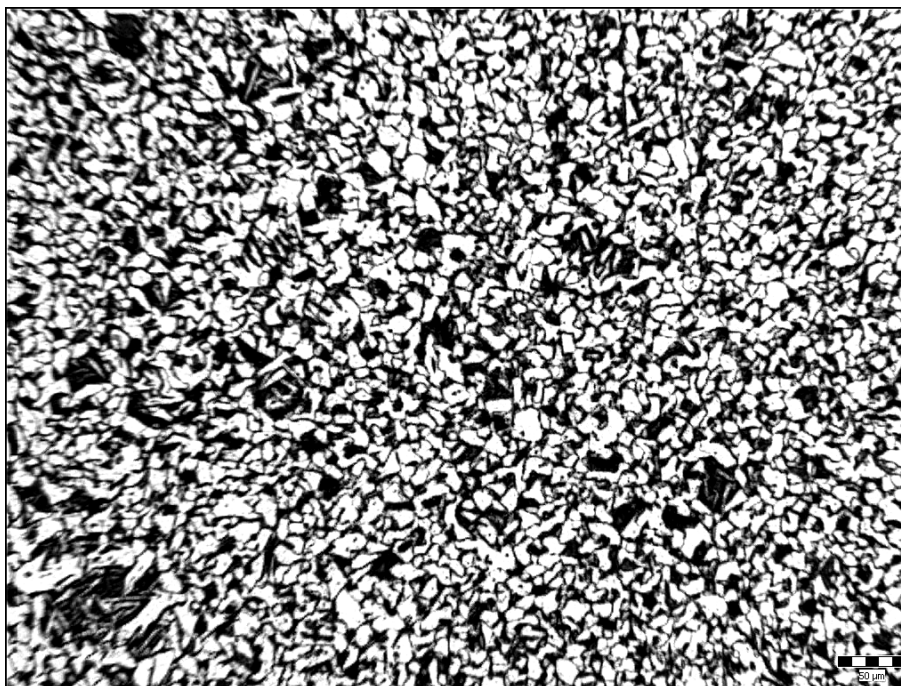


Vzorek 1 rovnoměrná perlitická struktura s řádkovitostí perlitu 100x zvětšeno

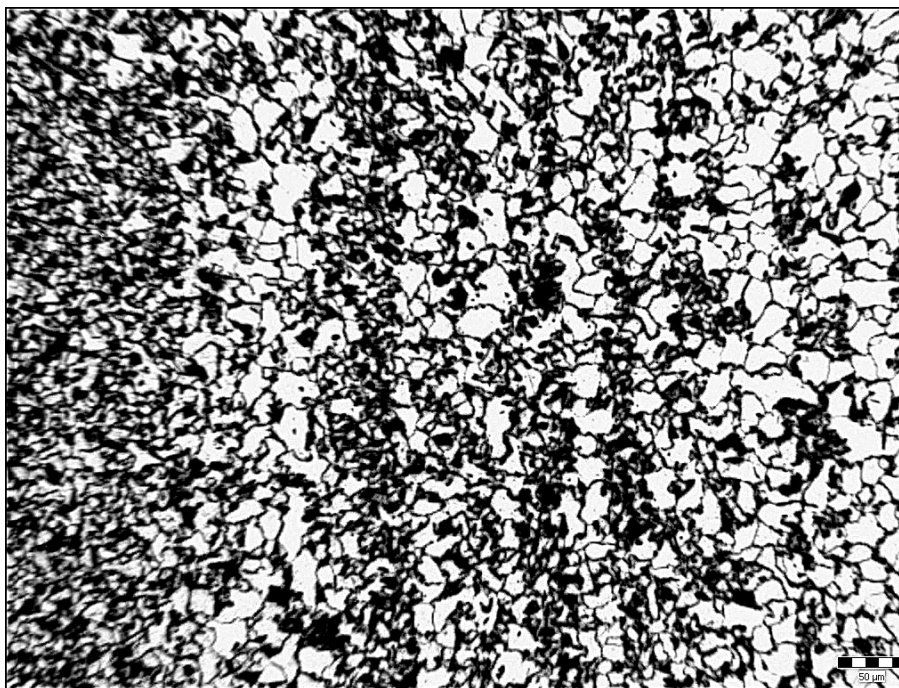




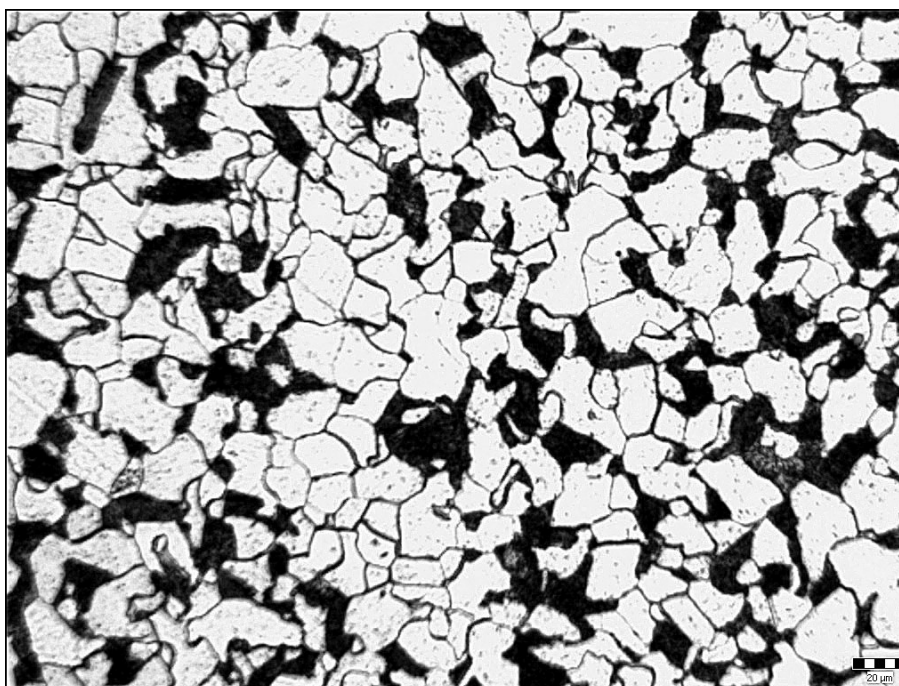
Vzorek 1 překrystalizace zrn perlitu 100x zvětšeno



Vzorek 1 stejnomořná perlitická struktura s místy vyloučenými hrubými zrny perlitu  
100x zvětšeno

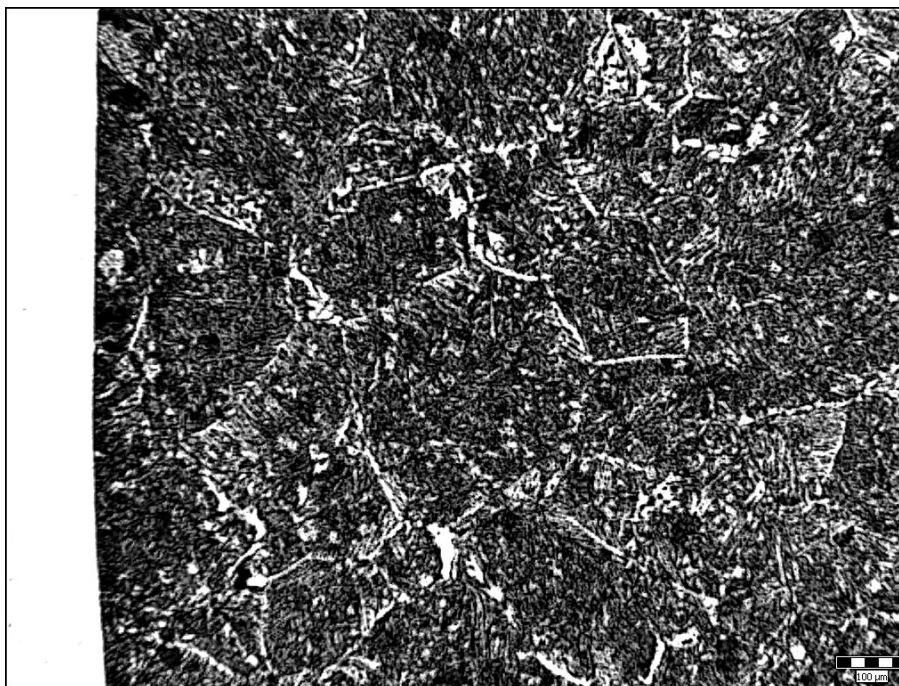


Vzorek 1 perliticko-feritická struktura, perlit vyloučen v řádcích 100x zvětšeno

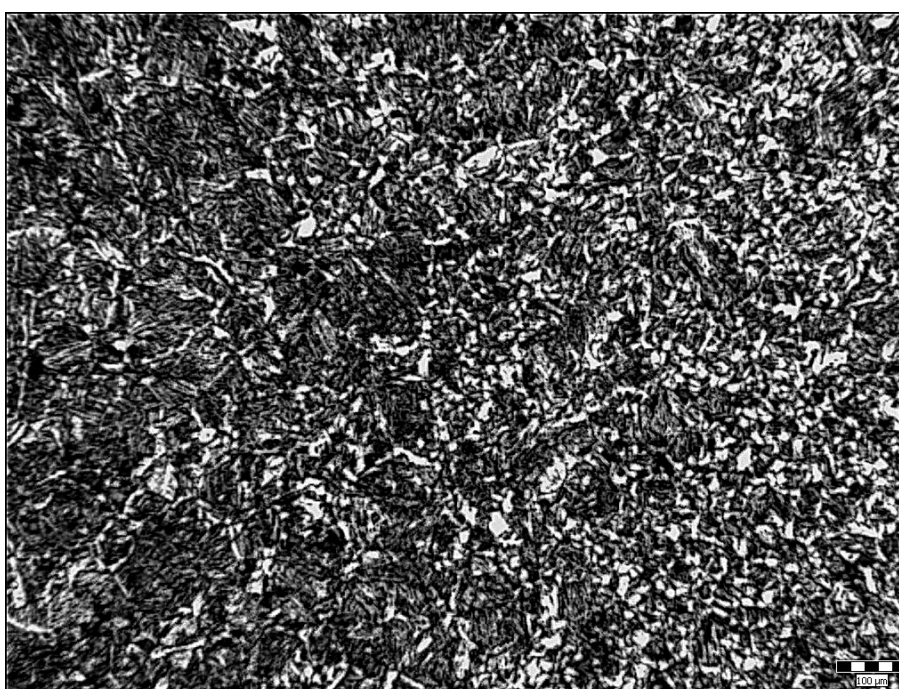


Vzorek 1 rovnoměrná perlitická struktura s řádkovitostí perlitu 200x zvětšeno

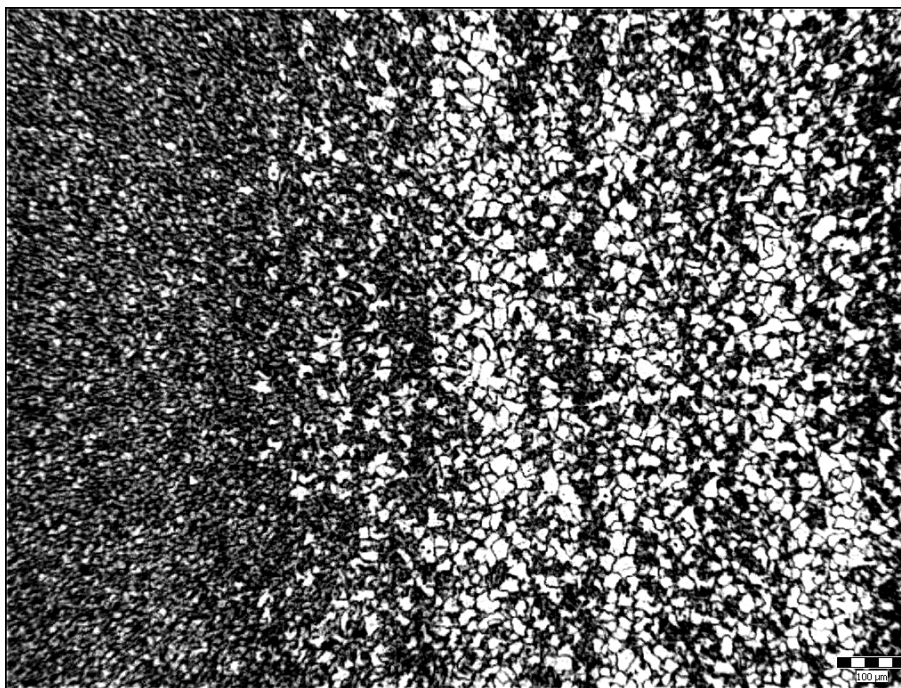




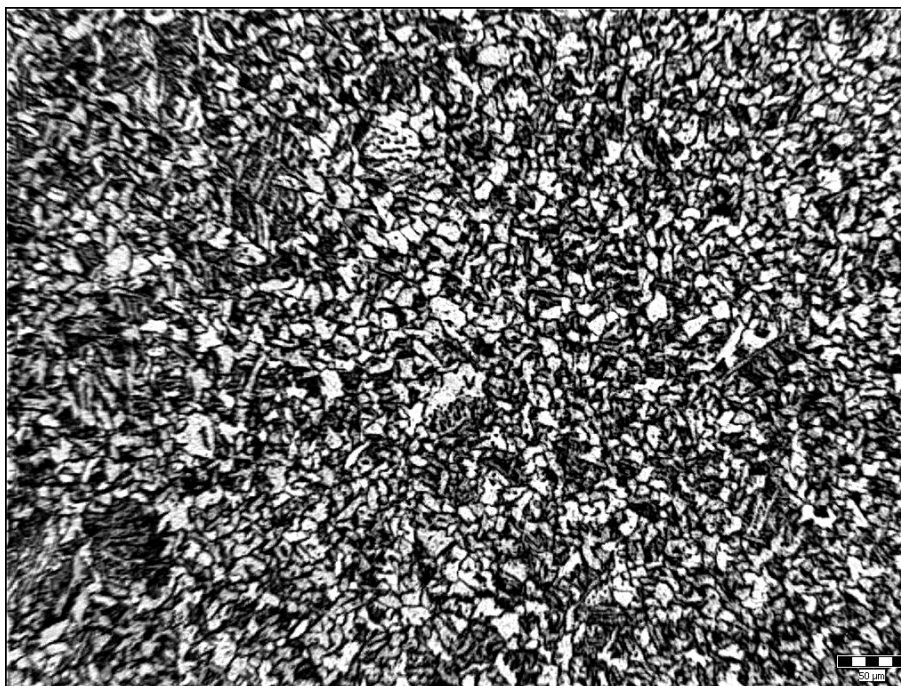
Vzorek 3 hrubozrnná feritická struktura s feritickým síťováním 50x zvětšeno.



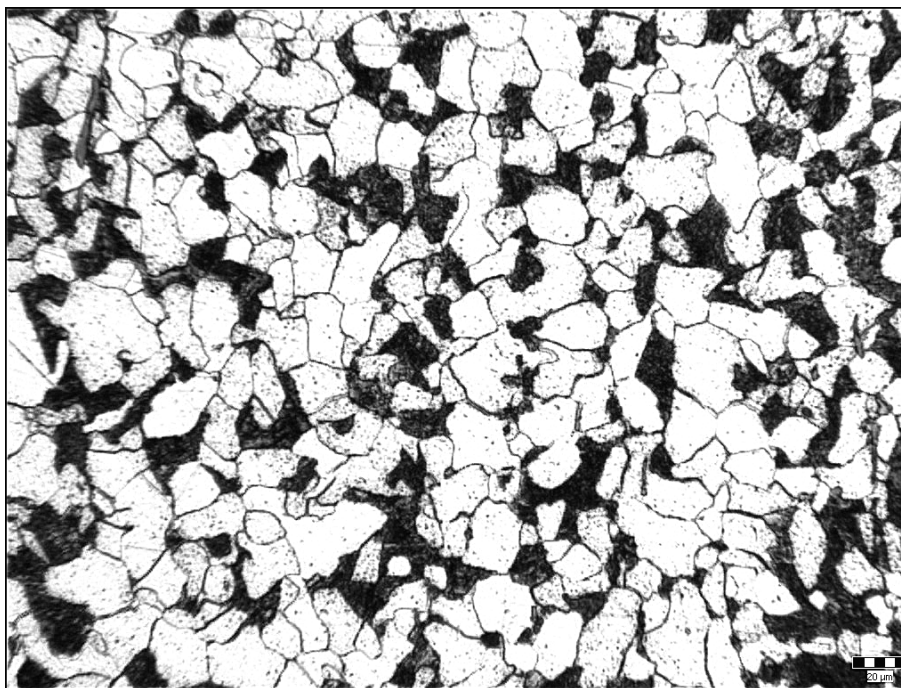
Vzorek 3 překrystalizace zrn perlitu 50x zvětšeno



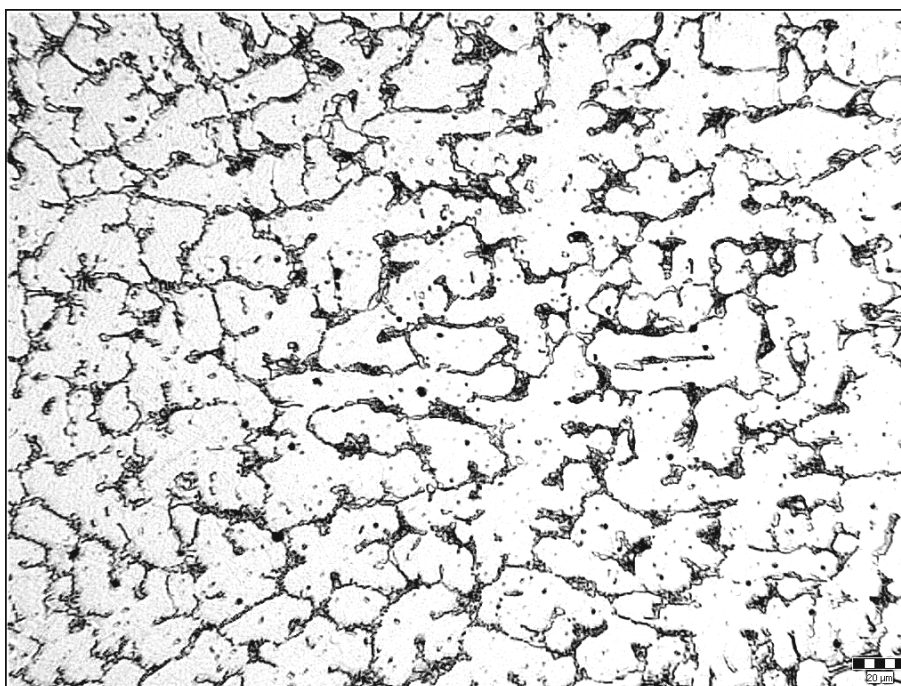
Vzorek 3 perliticko-feritická struktura, perlit vyloučen v řádcích 50x zvětšeno



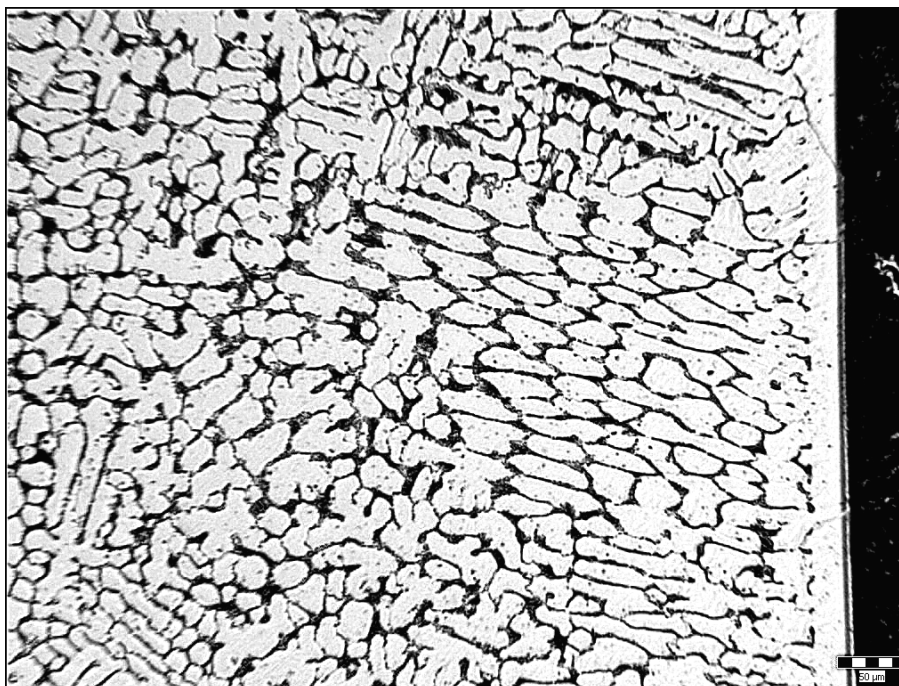
Vzorek 3 stejnoměrná perlitická struktura s místy vyloučenými hrubými zrny perlitu  
100x zvětšeno



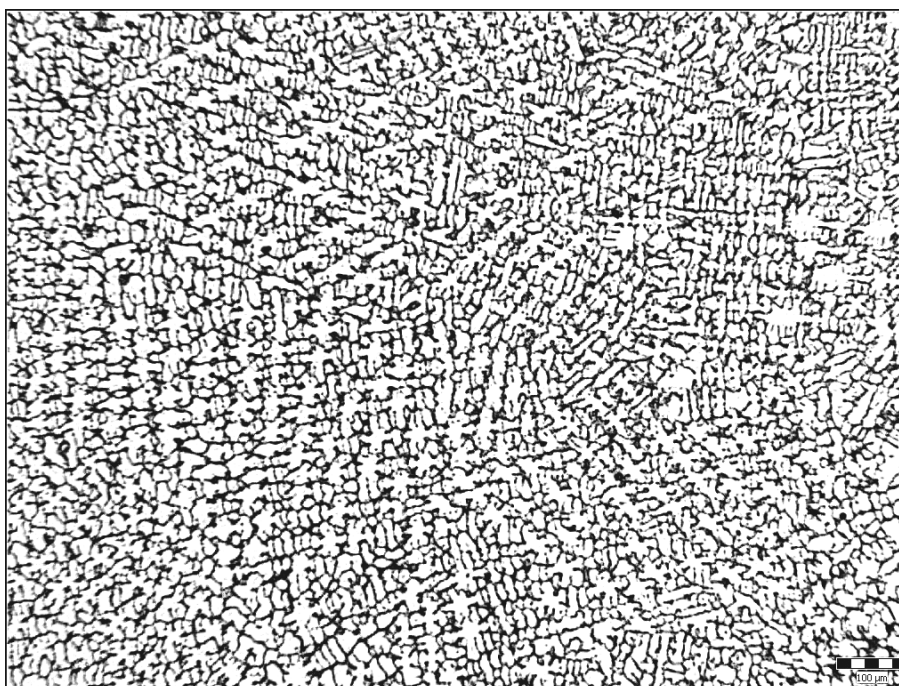
Vzorek 3 rovnoměrná perlitická struktura s řádkovitostí perlitu 100x zvětšen



Vzorek 1 Stelit 200x zvětšeno

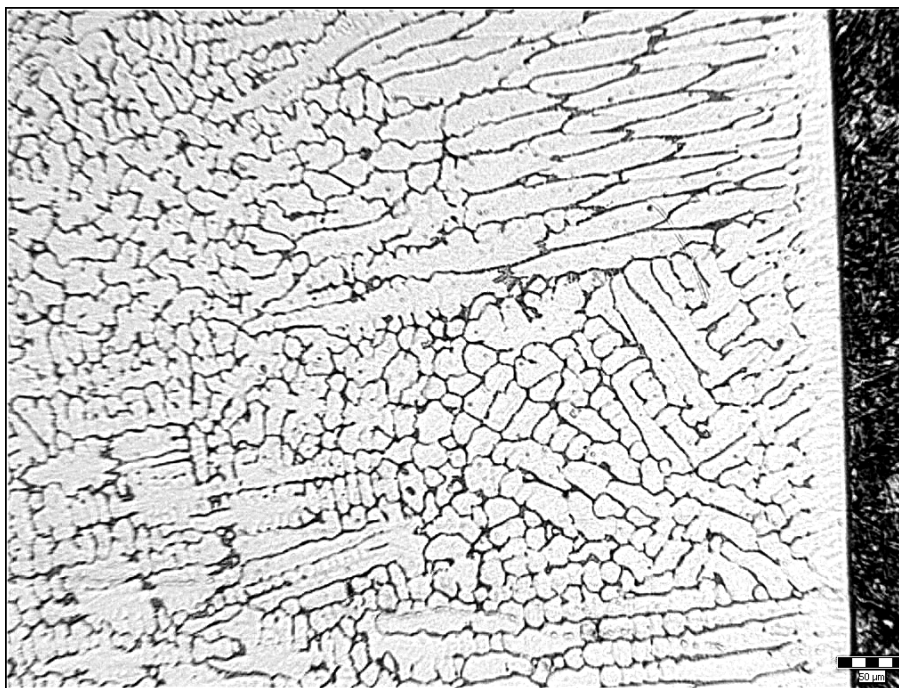


Vzorek 1 Stelit a hranice stavení 100x zvětšeno

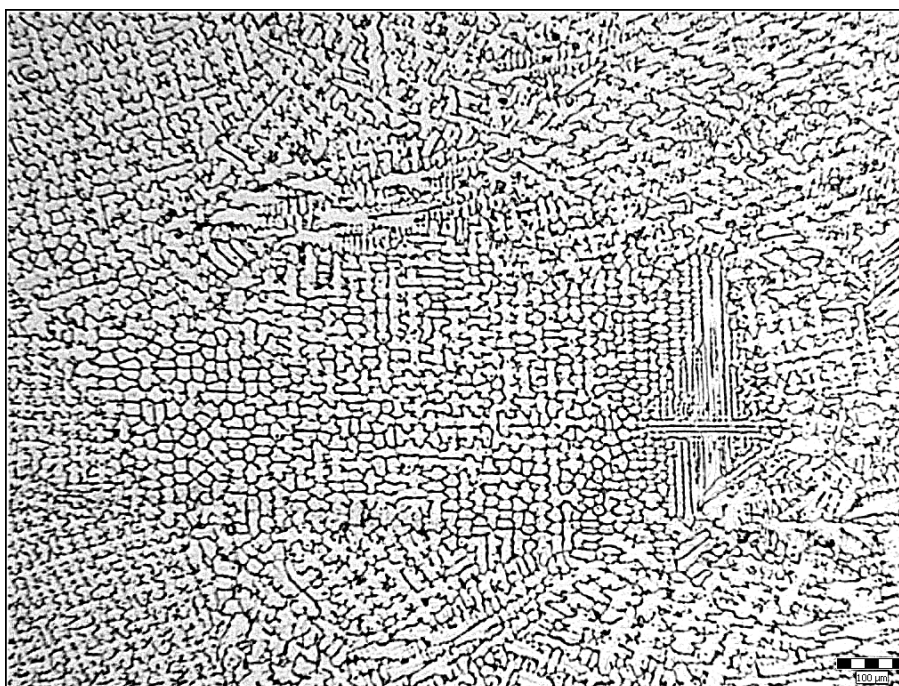


Vzorek 1 Stelit 50x zvětšeno





Vzorek 3 Stelit a hranice stavení 100x zvětšeno



Vzorek 3 Stelit 50x zvětšeno